Yüzey Dielektrik Bariyer Deşarj Plazmanın Bazı Mikroorganizmalara ve Gıda Küflenmesine Etkisinin İncelenmesi

Emine Ceren Kütük

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Aralık 2024

Investigation of the Effect of Surface Dielectric Barrier Discharge Plasma on Some Microorganisms and Food Mold Growth

Emine Ceren Kütük

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Physics

December 2024

Yüzey Dielektrik Bariyer Deşarj Plazmanın Bazı Mikroorganizmalara ve Gıda Küflenmesine Etkisinin İncelenmesi

Emine Ceren Kütük

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca
Fizik Anabilim Dalı
Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. Tamer AKAN

"ESOGÜ-BAP tarafından FYL-2024-3169 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir."
Aralık 2024

ONAY

Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi **Emine Ceren Kütük**'ün YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Yüzey Dielektrik Bariyer Deşarj Plazmanın Bazı Mikroorganizmalara ve Gıda Küflenmesine Etkisinin İncelenmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Tamer AKAN

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Prof. Dr. Tamer AKAN

Üye: Prof. Dr. Sadiye ÇETİNKAYA ÇOLAK

Üye: Doç. Dr. Harun BÖCÜK

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ……..…….. tarih ve ……..…… sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. ....

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Tamer Akan danışmanlığında hazırlamış olduğum "Yüzey Dielektrik Bariyer Deşarj Plazmanın Bazı Mikroorganizmalara ve Gıda Küflenmesine Etkisinin İncelenmesi" başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim.
27/12/2024

Emine Ceren Kütük

İmza

ÖZET

Antimikrobiyal plazma etkileri, yara iyileştirmesi, kanser/tümör tedavisi, patojenlere bağlı cilt veya diş hastalıkları, hijyen, gıda ve tarım işleme gibi tedavi alanlarında umut vadetmektedir. Yüzey Dielektrik Bariyer Deşarj (YDBD) plazmaları biyolojik hücreden uzak mesafede oluşturulabildiğinden, büyük hacimlerde soğuk plazmanın uygulanmasında, atmosfer havasını gaz olarak kullanabilme, vakum gerektirmeme, basit, uygun maliyetli ve kullanımı kolay olmaları nedeniyle antimikrobiyal amaçlar için en yaygın kullanılan plazma sistemleridir. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Soğuk Plazma Laboratuvarı'nda farklı boyutlara ve özelliklere sahip biyolojik hücre içeren örnekler için uygulanabilen yeni bir biyo-uygulamalar için geliştirilmiş, 6,2 litre kapasiteli bir plazma sterilizasyon ünitesi YDBD reaktörü üretildi. Gram-negatif *E. coli* ve *P. aeruginosa* ile Gram-pozitif *S. aureus* ve *E. faecalis* planktonik bakterileri, YDBD reaktöründe soğuk plazmaya maruz bırakılarak 600 saniye içinde inaktive edildi. Atmosfer havasında soğuk plazma üreten YDBD reaktörünün, yüksek seviyede antimikrobiyal etkiye sahip olan UV ışını, atomik oksijen, ve NO molekülleri ürettiği optik emisyon spektrometresi ile gözlemlendi. YDBD reaktörünün mikro-deşarjlardaki filament akımı şönt resistör yardımıyla ölçüldü ve en yüksek 37,4 mA değeri bulundu. Dijital osiloskop ve yüksek voltaj probu ile bulunan plazma voltajı ve plazma akımları ile elde edilen ortalama güç 31,4 W ve enerji yoğunluğu 104,7 J/L olarak bulundu. Literatür çalışmalarından kıyaslama ile YDBD reaktörü 250 ppm'in üzerinde ozon üretildiğini göstermektedir. YDBD reaktörü içinde çilek, çeri domates, peynir ve ekmek gibi gıdalar soğuk plazmaya maruz bırakılarak raf ömrü arttırma etkisi test edildi. Son olarak *Aspergillus sp.* küfü üzerinde FTIR incelemesi yapılarak plazma maruziyeti sayesinde bağ yapılarının değişimi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yüzey Dielektrik Bariyer Deşarj (YDBD), Sterilizasyon, *E. coli, P. Aeruginosa, S. Aureus, Aspergillus sp.*

SUMMARY

The potential of antimicrobial plasma effects in fields such as wound healing, cancer treatment, pathogen-induced skin and dental diseases, hygiene, and food/agricultural processing is a subject of considerable interest. Surface Dielectric Barrier Discharge (SDBD) plasmas are the most commonly used for antimicrobial applications due to their ability to generate plasma at a distance from biological cells, use atmospheric air as a gas, not require vacuum, and be simple, cost-effective, and easy to use. At Eskisehir Osmangazi University's Cold Plasma Laboratory, a 6.2-liter SDBD plasma sterilization unit has been developed for bio-applications that can treat samples containing biological cells of various sizes and properties. Gram-negative *E. coli* and *P. aeruginosa* and Gram-positive *S. aureus* and *E. faecalis* were inactivated within 10 minutes of exposure to cold plasma in the SDBD reactor. Optical emission spectrometry revealed that the reactor, operated in atmospheric air, produced UV radiation, atomic oxygen, and NO molecules which exhibited potent antimicrobial properties. The filament current of the reactor's micro-discharges, measured with a shunt resistor, reached 37.4 mA. The average power, as determined from plasma voltage and currents using an oscilloscope and high-voltage probe, was 31.4 W, with an energy density of 104.7 J/L. Literature comparison showed the SDBD reactor produces ozone levels above 250 ppm. Cold plasma was applied to foods like strawberries, cherry tomatoes, cheese, bread, and its effect on shelf life was tested. Finally, FTIR analysis was performed on *Aspergillus sp.* mold to examine changes in bond structures from plasma exposure.

Keywords: Surface Dielectric Barrier Discharge (SDBD), Sterilisation, *E. coli, P. Aeruginosa, S. Aureus, Aspergillus sp.*

TEŞEKKÜR

Öncelikle tez danışmanım, hocam Prof. Dr. Tamer Akan'a, bilgi ve deneyimlerini cömertçe paylaşarak bana rehberlik ettiği için sonsuz teşekkür ederim. Bana sağladığı kıymetli rehberlik, sabır ve yönlendirmeler için minnettarım. Araştırmamın her aşamasında sağladığı desteği, yapıcı eleştirileri ve sabırlı yaklaşımı benim için çok değerliydi. Onun desteği olmadan bu tezi bu noktaya getirmem mümkün olmazdı.

Aynı zamanda Çağrı Durmuş hocama ve Uğur Demirkol hocama öğrendiğim ve yardımcı oldukları her şey için teşekkür ederim. Ayrıca yüksek lisansım boyunca da bana moral veren, motivasyon sağlayan ve sabırla yanımda olan başta annem olmak üzere bütün yakınlarıma da teşekkür etmek isterim. Bu tezi hazırlama sürecimde bana destek olan, yönlendiren ve değerli katkılar sağlayan herkese teşekkürlerimi sunarım.

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonuna destekleri için (ESOGÜ-BAP, Proje No: FYL-2024-3169) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET vi

SUMMARY vii

TEŞEKKÜR viii

İÇİNDEKİLER ix

ŞEKİLLER DİZİNİ xi

ÇİZELGELER DİZİNİ xiv

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xv

1. GİRİŞ VE AMAÇ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 8

2.1. Plazma ve Deşarj 8

2.2. Hacim Dielektrik Bariyer Deşarj 11

2.3. Düzlemsel Bir Konfigürasyon Temelinde DBD Plazmasının Fiziği 14

2.4. Yüzey Dielektrik Bariyer Deşarj 17

2.5. *Aspergillus sp.* Küfü Genel Özellikleri 24

3. MATERYAL VE YÖNTEM 28

3.1. YDBD Reaktörü 28

3.2. Güç Kaynağı 30

3.3 Yüksek Voltaj Probu 32

3.4. Osiloskop 32

3.5. Akış Ölçer (debimetre) 33

3.6. Spektroskopi Cihazı 34

3.7. Nem Ölçer 35

3.8. Sıcaklık Ölçer 36

3.9. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi (FTIR) 36

İÇİNDEKİLER

Sayfa

3.10. Bakteriyel İşlemler 37
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 38
4.1. Elektriksel Analiz 38
4.2. Optiksel Analiz 40
4.3. Nem, Sıcaklık ve Ozon Ölçümü 41
4.4. Bakteriyel İnaktivasyon 42
4.5. Gıda Üzerine Uygulama 47
4.6. *Aspergillus sp*. Üzerine YDBD Uygulamasının FTIR Kullanılarak İncelenmesi 55
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 60
KAYNAKLAR DİZİNİ 62

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

2.1 Plazmanın farklı türleri. ... 8
2.2 a.) Gaz deşarj sürecinde voltaj akım grafiği, **b.)** Townsend ve **c.)** Şerit (Streamer) teorisine göre gazın ateşlenerek plazma oluşum süreci. ... 10
2.3. DBD konfigürasyonlarının şematik gösterimleri 13
2.4. DBD'da mikro deşarjların görünümü ve uygulama voltajının artmasıyla hacimsel deşarja evrilmesi(Δd=2mm). 14
2.5. Düzlemsel bir DBD konfigürasyonunda ilk üç yarım döngüde plazma gelişiminin şematik diyagramı. ... 15
2.6. YDBD şematik gösterimi. ... 17
2.7. Farklı basınçlarda YDBD plazmaları (Δd=1mm). ... 18
2.8. YDBD deşarjın pozitif ve negatif yarı döngüde gelişimi. ... 19
2.9. Bir AC YDBD plazmasının eşdeğer elektriksel modeli. ... 19
2.10. Farklı geometrilerde üretilen YDBD plazmaları ... 20
3.1. YDBD Reaktörünün **a.)** şematik gösterimi, **b.)** fotoğrafı, **c.)** YDBD plazması ... 30
3.2. AC güç kaynağının tasarımı. ... 30
3.3. AC güç kaynağının osiloskop çıktısı. ... 31
3.4. Güç kaynağı fotoğrafı. ... 32
3.5. Yüksek voltaj probu fotoğrafı. ... 32
3.6. Osiloskop fotoğrafı. ... 33
3.7. Akış ölçer fotoğrafı. ... 33
3.8. Optik emisyon spektrometresi. ... 35
3.9. Nem ölçer fotoğrafı. ... 35
3.10. Sıcaklık ölçer fotoğrafı. ... 36
3.11. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi (FTIR) fotoğrafı. ... 36
4.1 a.) Plazma üretmek için kullanılan güç kaynağının çıkış gerilimi, **b.)** YDBD reaktörüne uygulanan gerilim, **c.)** bir darbe deşarj süresi boyunca şönt direnci

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

üzerindeki gerilim ve **d.)** deşarj akımının ve uygulanan gerilimin zamanla değişim grafiği. 39
4.2. YDBD plazması optik emisyon spektrumu. 41
4.3. Farklı sürelerde YDBD-hava plazma uygulanan inkübasyondan sonra *P. aeruginosa* planktonik bakteri içeren agar plakalarının fotoğrafları. 43
4.4. Farklı sürelerde YDBD-hava plazma uygulanan inkübasyondan sonra *E. coli* planktonik bakteri içeren agar plakalarının fotoğrafları. 45
4.5. Farklı sürelerde YDBD-hava plazma uygulanan inkübasyondan sonra *S. aureus* planktonik bakteri içeren agar plakalarının fotoğrafları. 45
4.6. Farklı sürelerde YDBD-hava plazma uygulanan inkübasyondan sonra *E. faecalis* planktonik bakteri içeren agar plakalarının fotoğrafları. 46
4.7. YDBD reaktörü içindeki plazmaya maruz bırakılan çilek fotoğrafı. 47
4.8. Farklı sürelerde YDBD-hava plazması uygulanan çileklerin zaman içindeki değişim fotoğrafları. 48
4.9. YDBD reaktörü içindeki plazmaya maruz bırakılan çeri domates fotoğrafı. 49
4.10. Farklı sürelerde YDBD-hava plazması uygulanan çeri domateslerin zaman içindeki değişim fotoğrafları. 50
4.11.YDBD reaktörü içindeki plazmaya maruz bırakılan peynir fotoğrafı. 51
4.12. Farklı sürelerde YDBD-hava plazması uygulanan peynirlerin zaman içindeki değişim fotoğrafları. 52
4.13. YDBD reaktörü içindeki plazmaya maruz bırakılan ekşi mayalı ekmek fotoğrafı. ... 53
4.14. Farklı sürelerde YDBD-hava plazması uygulanan ekşi mayalı ekmeklerin zaman içindeki değişim fotoğrafları. 54
4.15. *Aspergillus sp.* küfünün fotoğrafı. 55
4.16. YDBD reaktörü içerisindeki *Aspergillus sp.* küfünün fotoğrafı. 56
4.17. Maruziyet sonrasında YDBD reaktöründen alınan *Aspergillus sp.* küfünün fotoğrafı. 56

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

4.18. *Aspergillus sp.* küfü üzerine YDBD uygulaması sonrasında alınan FTIR spektrumu. 57

4.19. **a)** FTIR spektrumunun 950-1600 cm^{-1} arasındaki grafiği. **b)** FTIR spektrumunun 2800-3080 cm^{-1} arasındaki grafiği. 58

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

3.1. AC güç kaynağının özellikleri. 31
3.2. Optik emisyon spektrometresinin özellikleri. 34

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
kV	kilo Volt
kHz	kilo Hertz
MHz	Mega Hertz
AC	Alternatif Akım
DC	Doğru Akım
eV	Elektron Volt
K	Kelvin
λ	Dalgaboyu
Pa	Paskal
Ar	Argon
N	Azot atomu
N_2	Azot molekülü
N_2^+	Azot iyonu
NO	Azot Oksit
OH	Hidroksil
T_e	Elektron sıcaklığı
T_i	İyon sıcaklığı
T_u	Uyarılmış atomların sıcaklığı
T_g	Nötral atomların sıcaklığı
T_f	Fotonların enerjisi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
n_e	Elektron yoğunluğu
Z	Atom numarası
DBD	Dielektrik Bariyer Deşarj
YDBD	Yüzey Dielektrik Bariyer Deşarj
HDBD	Hacim Dielektrik Bariyer Deşarj
EDYBD	Eş Düzlemli Yüzey Bariyer Deşarjı
MD	Mikro Deşarj
ICCD	Yoğunlaştırılmış Cihaz Görüntüleri
HV	Yüksek Voltaj
GND	Toprak elektrodu
RF	Radyo Frekansı
MW	Mikrodalga
TTD	Toplam Termodinamik Denge
LTD	Lokal Termodinamik Denge
non-LTD	Lokal Termodinamik Dengede olmayan
SABP	Soğuk Atmosferik Basınç Plazmasının
YVASP	Yüksek Voltajlı Atmosferik Soğuk Plazma
UVSP	Ultraviyole Soğuk Plazma
VOC	Uçucu Organik Bileşikler
CFU/mL	Mililitre başına koloni oluşturan birim

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	**Açıklama**
OES	Optik Emisyon Spektroskopisi
LCD	Sıvı Kristal Ekran
UV	Ultraviyole
VIS	Görünür
IR	Kızılötesi
FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
ATR	Zayıflatılmış Toplam Yansıma
RNT	Reaktif Azot Türleri
ROT	Reaktif Oksijen Türleri
PPO	Polifenol Oksidaz
POD	Peroksidaz
PDA	Patates Dekstroz Agar
TSB	Tryptic Soy Broth
TSA	Tryptic Soy Agar
OTA	Okratoksin A
LAB	Laktik Asit Bakterileri
C. albicans	*Candida albicans*
E. faecalis	*Enterococcus faecalis*
S. Enteritidis	*Salmonella enteritidis*
B. subtilis	*Bacillus subtilis*

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	**Açıklama**
A. flavus	*Aspergillus flavus*
A. ochraceus	*Aspergillus ochraceus*
A. parasiticus	*Aspergillus parasiticus*
P. aeruginosa	*Pseudomonas aeruginosa*
E. coli	*Escherichia coli*
S. aureus	*Staphylococcus aureus*

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Plazma, katı, sıvı ve gaz hallerinden ayrı dördüncü bir madde halidir ve evrenin %99'unun kapsadığı maddeyi oluşturur. Plazma, elektronlar (e^-), N^+, H^+, O_2^+, N_2^+, H_2O^+, N^-, O^-, OH^-, NO_2^- gibi pozitif ve negatif iyonlar, H*, O_2*, N_2*, Ar* gibi yüksek enerji seviyeli (uyarılmış) gaz atomları ve moleküller, $O_2(a^1\Delta_g)$, $N_2(a^1\Pi_g)$), Ne* gibi geçici kararlılar (metastable), OH•, O_2•, O•, NO•, NO_2•, NO_3• gibi serbest radikaller, $^1O_2$, H_2O_2, O_3, ONOOH reaktif oksijen türleri (ROT), NO, NO_2, NH_3, NO_3^-, $ONOO^-$ gibi reaktif azot türleri (RNT), He, Ne, Ar, O, O_2, H_2O, N, N_2 gibi nötr gaz atomları ve moleküllerini içeren farklı kütlede ve özellikte çok sayıda farklı türden oluşur (Akan ve Durmuş, 2023). Plazmalar ayrıca kızılötesi (IR), görünür (VIS) ve ultraviyole (UV) aralıklarında farklı dalga boylarında radyasyon (foton) üretirler (Akan ve Durmuş, 2023). Plazma, genellikle yüksek sıcaklık ve enerjiye sahip olan yıldızların içinde bulunsa da laboratuvar ortamında da üretilebilir. Laboratuvar koşullarında genelde bir gaza yüksek voltaj uygulanarak plazma üretildiği için plazmalar aynı zamanda yüksek elektromanyetik alan içindedirler. Plazma, elektronların serbestçe dolaştığı, pozitif ve negatif yüklü parçacıkların bir arada bulunduğu bir ortamda meydana gelir. Bu yüklü parçacıklar arasındaki etkileşimler, çok sayıda kimyasal reaksiyona neden olur ve bu da birçok farklı kimyasal türün varlığına işaret eder.

Plazma, birçok endüstriyel ve bilimsel uygulamada önemli bir rol oynar. Plazma, metallerin kesilmesi, kaynak yapılması, yüzeylerin işlenmesi gibi bir dizi malzeme işleme uygulamalarında, yüzeylerin temizlenmesi ve malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirmek için kullanılır. İyon implantasyonu ve yüzey modifikasyonu, yarıiletken endüstrisinde yaygın olarak kullanılan plazma işleme yöntemleridir. Plazma, endüstriyel atık arıtma süreçlerinde kirleticilerin giderilmesi, kimyasal ve biyolojik arıtma yöntemlerinin yanı sıra plazma arıtma, zorlu kirleticileri gidermek için etkili bir seçenek sunar. Endüstriyel prosesler sırasında oluşan zararlı gazların temizlenmesi ve geri dönüşümü için plazma kullanılabilir. Yüzey aktif maddelerin (deterjanlar, köpük önleyiciler vb.) üretiminde kullanılır. Bu maddeler, temizlik ürünleri ve gıda işleme endüstrisinde yaygın olarak kullanılır. İlaçların üretim süreçlerinde sterilizasyon ve

kimyasal işlemlerde kullanılabilir. Gıdaların sterilizasyonu ve dezenfeksiyonunda kullanılır. Bu, gıda işleme endüstrisinde ürünlerin raf ömrünün uzatılmasına yardımcı olur. Malzemelerin yüzeylerine ince kaplamalar uygulamak ve renklendirmek için kullanılır. Bu, takı üretimi ve optik endüstrisinde sıkça görülür. Hava ve su kirleticilerini gidermek için kullanılır. Bu, çevresel koruma açısından önemli bir uygulamadır. Cerrahi aletlerin sterilizasyonu, yara iyileşmesi, kanser tedavisi ve diş sağlığı uygulamaları dahil olmak üzere tıbbi alanlarda kullanılır. Mikroçip üretimi, güneş panelleri ve LCD (Sıvı Kristal Ekran) ekranlar gibi elektronik cihazların üretiminde temizleme ve işleme için kullanılır. Spektroskopi ve kütle spektrometresi gibi analitik tekniklerde örneklerin hazırlanmasında ve atomik ve moleküler analizlerde kullanılır. Plazma gazifikasyonu, katı atıkları enerji üretimi için gazlara dönüştürme işlemlerinde de kullanılmaktadır. Sıcak plazma, atık yakma tesislerinde ve nükleer füzyon araştırmalarında enerji üretmek için kullanılır. Plazma, elektromanyetik radyasyon üreten bir kaynak olarak da kullanılır. Bu nedenle, astronomide, yıldızların iç yapısı ve evrenin yapısı hakkında bilgi edinmek için gözlemlerde önemli bir rol oynar. Plazmanın bu geniş uygulama yelpazesi, onu modern bilim ve teknolojinin temel bir bileşeni haline getirir.

Plazma, laboratuvar koşullarında genellikle helyum, argon, oksijen veya azot gibi gazlara elektrik voltajı uygulanarak üretilir. Laboratuvar plazmaları genellikle belirli özelliklerine göre sınıflandırılırlar. *1.Sıcak Plazma ve Soğuk Plazma:* Bu sınıflandırma, plazmanın sıcaklığına göre yapılır. Sıcak plazma, yüksek sıcaklıklarda (genellikle milyonlarca derece) bulunan plazmalardır ve yıldızlar gibi yüksek sıcaklık ortamlarında bulunur. Soğuk plazma ise daha düşük sıcaklıklarda (yaklaşık oda sıcaklığında veya daha düşük) ve 10^{-3} mbar kadar düşük basınçlarda üretilebilmektedir. Endüstriyel, tıbbi ve malzeme bilimi uygulamalarında kullanılır. Bu tür plazmalarda, elektronlar ortalama kinetik enerjileri 1-7 eV (1 eV ≈ 11600 K) olan başlıca enerjtik parçacıkları temsil ederler. Genel olarak, bu tür plazmalardaki iyonlaşma derecesi %0,001'den azdır ve gaz sıcaklıkları 100 °C'nin altındadır, ancak çoğunlukla oda sıcaklığında bulunur (Akan ve Durmuş, 2023). *2. Basınçlı ve Atmosferik Plazma:* Bu sınıflandırma, plazmanın hangi basınçta çalıştığına dayanır. Basınçlı plazmalar, genellikle düşük basınçlı gazların kullanıldığı laboratuvar koşullarında üretilir. Atmosferik plazma ise normal atmosfer basıncında (yaklaşık 1 atmosfer) çalışır ve endüstriyel uygulamalarda tercih edilir. Özellikle atmosferik havayı kullanarak başka bir gaza ihtiyaç duyulmadığı için ekonomik ve basit sistemler

üretilmesine olanak sağlamaktadır. *3. Kesikli ve Sürekli Deşarj Plazma:* Kesikli deşarj plazma, belirli aralıklarla açılıp kapanan bir deşarjla üretilir. Sürekli deşarj plazma ise sürekli bir şekilde çalışır ve sürekli olarak plazma üretir. Sürekli deşarj plazma, yüzey işleme ve kaplama uygulamalarında yaygın olarak kullanılır.

Atmosferik basınç soğuk plazmalar, teknolojik açıdan önemli bir gelişme sunar. Diğer yüksek sıcaklık plazma sistemlerine göre daha düşük sıcaklıklarda çalıştıkları için, hassas elektronik bileşenlerin veya biyolojik örneklerin işlenmesi ve korunmasında büyük avantaj sağlarlar. Bununla birlikte, bu plazmaların düşük maliyetli bir şekilde üretilebilmesi ve bakımının kolay olması, ekonomik açıdan da büyük bir kazançtır. Sistem basitliği açısından da atmosferik basınç soğuk plazmalar öne çıkar. Yüksek vakum gerektirmeyen bu plazma sistemleri, laboratuvar ortamlarında ve endüstriyel üretim hatlarında kolayca kullanılabilir. Atmosferik basınç plazmalarının hava kullanma avantajları oldukça çekicidir. Öncelikle, hava, yaygın bir kaynak olup kolayca temin edilebilir. Bu, özel gazların maliyetli ve sınırlı erişimine kıyasla atmosferik plazma teknolojisinin daha geniş bir kullanım alanına yayılmasını sağlar. Ayrıca, hava kullanımı çevre dostu bir yaklaşım sunar. Özel gazların çevresel etkileri göz önüne alındığında, hava ile çalışmak, olumsuz çevresel etkileri azaltabilir. Hava kullanımının diğer bir avantajı, çeşitli endüstrilerdeki uygulanabilirliğidir. Kimya, malzeme bilimi, yüzey işleme, biyomedikal araştırmalar ve gıda endüstrisi gibi birçok alanda atmosferik basınç plazmaları hava ile çalışabilir. Ayrıca, hava kullanımı özel gazlara göre daha güvenlidir. Özel gazların depolanması, taşınması ve kullanılması bazen güvenlik riskleri taşıyabilirken, atmosferik plazmalar hava kullanarak bu endişeleri azaltır.

Atmosferik basınçta çalışan hava ile beslenen soğuk plazmalar, biyoloji ve tıp alanında mikroorganizmaların inaktivasyonu, yüzey dezenfeksiyonu ve doku sterilizasyonu için kullanılır. Özellikle sterilizasyon işlemlerinde, geleneksel kimyasal yöntemlere göre daha hızlı ve etkili bir seçenek sunarlar. Bu, hastane ortamlarında ve tıbbi ekipman sterilizasyonunda büyük önem taşır. Özellikle enfekte olmuş yaraların tedavisinde, soğuk plazma uygulamalarının iyileştirici etkileri üzerine önemli çalışmalar yapılmıştır. Plazmanın, yara yüzeylerini temizlemek, enfeksiyon riskini azaltmak ve hızlı doku iyileşmesini teşvik etmek gibi avantajları vardır. Ayrıca, kanser tedavisinde de potansiyel bir rol oynamaktadır. Plazmanın kanser hücrelerini seçici olarak hedefleyebildiği ve kanser

hücrelerinin yok edilmesine yardımcı olabileceği belirtilmektedir. Dermatoloji ve cilt bakımı alanlarında kullanılan bu yöntemler, cilt sorunlarını tedavi etmek ve cilt sağlığını iyileştirmek için etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Soğuk plazma cilt kanseri tedavisinde kullanılabilir. Plazma, cilt yüzeyindeki kanser hücrelerini etkili bir şekilde yok edebilir ve bu, cerrahi müdahale gerektirmeyen bir seçenek sunar. Ayrıca, soğuk plazma cilt yüzeyindeki mikroorganizmaları öldürmede etkilidir. Bu, cilt enfeksiyonlarının tedavisinde ve cilt hijyeninin iyileştirilmesinde kullanışlıdır. Cilt yenilenmesi ve gençleştirme alanında da soğuk plazma kullanılır. Plazma, cilt hücrelerinin yeniden büyümesini teşvik edebilir ve ciltteki kırışıklıkları azaltabilir. Akne tedavisi de soğuk plazma ile mümkün olabilir. Plazma, akneye neden olan bakterileri öldürmek için kullanılabilir ve ciltteki iltihaplanmayı azaltabilir. Son olarak, plazma cilt yüzeyindeki lekeleri ve pigmentasyon sorunlarını hafifletebilir, cilt tonunu düzeltebilir ve cilt rengini eşitleyebilir (Akan, 2014). Ziraat ve gıda endüstrisinde, atmosferik basınç plazmaları ürünlerin dezenfeksiyonu ve muhafazasında kullanılır. Gıda güvenliği, raf ömrü uzatma ve kalite kontrolü gibi alanlarda bu plazmaların etkili bir şekilde kullanılması, gıda ürünlerinin daha güvenli ve uzun süre saklanmasına yardımcı olur. Plazma, yüzeylerde ve ambalaj malzemelerinde bulunan patojen mikroorganizmaları etkili bir şekilde öldürebilir, bu da gıdaların daha uzun raf ömrüne sahip olmasına yardımcı olur. Ayrıca, meyve ve sebzelerin dekontaminasyonunda yaygın olarak kullanılır. Plazma, pestisit kalıntılarını azaltabilir ve böylece daha güvenli ve sağlıklı ürünler elde edilmesine katkı sağlar. Ayrıca, bu işlem ürünlerin raf ömrünü uzatabilir. Gıda ambalajı ve kaplamalarında da plazma teknolojisinin kullanımı artmaktadır. Plazma, ambalaj malzemelerini gıdaların oksijen, nem ve mikroplar gibi dış etkenlerden korunmasını sağlayacak şekilde modifiye edebilir. Bu, gıda ürünlerinin tazeliğini ve kalitesini daha uzun süre korumalarına yardımcı olur. Diş sağlığı alanında, atmosferik basınç plazmaları ağız hijyeni ve diş eti hastalıklarının tedavisinde kullanılır. Plak oluşumunu engellemek, bakteriyel enfeksiyonları kontrol etmek ve diş yüzeylerini temizlemek için kullanılan bu plazmalar, geleneksel diş bakım yöntemlerine güçlü bir alternatif sunar.

Atmosferik hava ile üretilen soğuk plazma sistemleri içinde en yaygın kullanılan sistemler; *Korona Deşarj:* Korona deşarj, yüksek gerilimle uyarılmış elektrotlar arasındaki boşlukta plazma üretimini içerir. Bu sistem, iyonlaştırma işlemi sırasında hava moleküllerinin etkileşimini kullanır ve düşük sıcaklıkta çalışabilir. Genellikle gazların

temizlenmesi ve hava arıtma sistemlerinde kullanılır. *Dielektrik Bariyer Deşarj (DBD):* DBD plazma, elektrotlar ve bir dielektrik malzeme arasındaki boşlukta plazma üreten bir konfigürasyondur. Atmosferik basınçta çalışabilir ve yüzey işleme, dezenfeksiyon, kaplama ve malzeme işleme gibi birçok uygulamada kullanılır. *Plazma Jetler:* Plazma jetleri, bir elektrot ve bir nozul aracılığıyla hava veya gazı plazmaya dönüştüren bir sistemdir. Atmosferik basınçta çalışabilir ve yüzey işleme, biyomedikal uygulamalar, gıda sterilizasyonu ve yüzey kaplama gibi birçok alanda kullanılır. Taşınabilir plazma jetleri de bulunur ve elde taşınabilir.

Dielektrik Bariyer Deşarjı (DBD), birçok endüstriyel ve bilimsel uygulama için en yaygın kullanılan bir plazma üretim tekniğidir. DBD'nin temel elektriksel konfigürasyonu, iki elektrot arasındaki dielektrik (yalıtkan) bir bariyerin bulunmasıdır. Bir elektrot yüksek gerilimle beslenirken, diğer elektrot topraklanır. DBD sistemindeki yüksek gerilim, elektrotlar arasındaki gazı iyonize eder ve bu iyonlaşma, hacim plazması, yüzey plazması ve kılcal plazma oluşumuna yol açar. Ancak, mikrodeşarjlar yoluyla ek bir adım ekleyerek hacim plazmasının üretilmesi sağlanabilir. Bu, dielektrik malzemenin içindeki mikroskobik boşluklarda gerçekleşen küçük deşarj olaylarıdır.

DBD ve yüzey dielektrik bariyer deşarjı (YDBD), temelde benzer bir prensibe dayanan iki farklı plazma üretim yöntemidir. Ancak aralarında önemli farklar vardır. DBD, iki elektrot arasındaki boşlukta gerçekleşir ve plazmayı bu aralıkta oluşturur. Plazma, elektrotlar arasındaki hacimde yoğunlaşır. Bu nedenle uygulama yapılmak istenen biyolojik hücre, gıda, tohum gibi numune plazma ortamı içine girmiş olur. Numunenin her bölgesine plazma teması olduğu için avantajlı olabilirken çok önemli bir dezavantajı bulunmaktadır. DBD plazmalarında oluşan plazma numuneye doğrudan temas ettiğinde özellikle numunenin şekilsel ya da hacimsel homejenliği yoksa plazma numunenin üzerinden akımı akıtma eğiliminde olmaktadır. Bu bazen numune üzerinde ark'a da neden olmaktadır. Numune üzerinden akım geçmesi hatta ark oluşması numuneye ciddi zarar verebilmektedir. Bu nedenle DBD ile hacimsel plazma üretimi ile numunenin plazma içine sokulması hatta plazma ile temas etmemesi istenebilmektedir. Yüzey Dielektrik Bariyer Deşarjı (YDBD) ise plazmayı bir elektrot ve bir dielektrik malzeme arasındaki yüzeyde oluşturur. Plazma, dielektrik malzemenin yüzeyinde yoğunlaşır ve genellikle yüzey işleme uygulamaları için kullanılır. YDBD'de plazma elektrotlar civarında oluştuğu için

numuneye uzak bölgede plazma üretilebilmektedir. Numuneye plazma temas etmemektedir ve numune üzerinden akım geçmesi gibi bir durum söz konusu olmamaktadır. DBD, daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilir ve plazma genellikle yüksek sıcaklıkta bulunur. YDBD, düşük sıcaklıklarda çalışır ve bu nedenle yüzey işleme uygulamaları için hassas malzemeleri koruma yeteneği sunar. DBD, enerjiyi daha etkili bir şekilde kullanabilir ve büyük hacimlerde plazma üretimi için uygundur. YDBD, enerjiyi daha düşük sıcaklıklarda ve küçük alanlarda kullanır, bu nedenle enerji verimliliği açısından avantajlıdır.

Biyoloji, gıda, ziraat, tıp, diş uygulamalarında YDBD plazmaları daha avantajlı olmaktadır ve son yıllarda oldukça teknolojik uygulamalara evrilmektedir. Şimdiye kadar üretilen YDBD'lerin çoğu, açık hava ortamında veya atmosfer basıncında kapalı bir hacimde üretilmiştir. Kapalı bir hacimde üretilen YDBD'ler genellikle bu kapalı hacmin kapağında üretilir (Akan ve Durmuş, 2023) . Bu tez çalışmasında, biyolojik hücreler içeren yüzeylerin işlenmesi için atmosfer basıncında kapalı bir hacimde çalışan yeni bir YDBD cihazı tasarlanmış ve üretilmiştir. Sistem, tasarım ve plazma üretim mekanizması açısından orijinal ve oldukça ucuz ve pratik sistemdir.

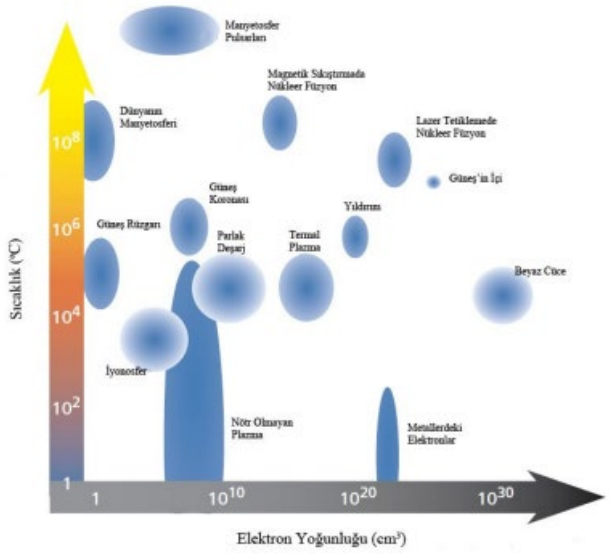
Bu çalışmada antimikrobiyal amaçlar için farklı boyutlara ve özelliklere sahip numunelere uygulanabilen yeni bir YDBD reaktörü üretildi. Gram-negatif *Pseudomonas aeruginosa* (*P. aeruginosa*) ve *Escherichia coli* (*E. coli*) ve Gram-pozitif *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) ve *Enterococcus faecalis* (*E. faecalis*) planktonik bakterileri, petri kabında agar üzerinde kültürlendi ve ürettiğimiz YDBD reaktörü içine konularak, atmosferik hava soğuk plazmaya 60, 180, 300 ve 600 saniye gibi farklı zamanlarda maruz bırakıldı. Tüm bakteriler 600 saniyede ürettiğimiz YDBD reaktörünün ürettiği atmosferik hava soğuk plazması ile tümüyle inaktive edildi. Atmosferik hava ortamında soğuk plazma üreten YDBD reaktörümüzde spektroskopik ölçümler ve ozon hesaplamaları ile UV radyasyonu, atomik oksijen, ozon ve yüksek antimikrobiyal aktiviteye sahip NO molekülleri üretildiği gözlemlenmiştir. Gıda, tarım, diş ve tıp uygulamalarında antibakteriyel amaçlar için kolayca kullanılabilecek bu yeni plazma reaktörünün elektriksel ölçümleri de son derece güvenli bir şekilde kullanılabilecek sistem olduğunu göstermiştir. Ayrıca çilek, çeri domates, peynir ve ekşi mayalı ekmeklerde yine YDBD reaktörü içine konularak atmosferik hava soğuk plazmaya 60, 180, 300 ve 600 saniye olarak farklı

sürelerde maruziyet uygulanmış ve uygulanan gıdalardaki küflerin üzerindeki olumlu etkisi incelenmiştir. Son olarak, *Aspergillus sp.* küfü FTIR kullanılarak incelenmiş ve küf mantarının oluşmasına sebep olan kırılan bağlar görülmüştür.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Plazma ve Deşarj

Maddenin dördüncü hali olan plazma evrenimizin büyük kısmını hala oluşturmaktadır (Şekil 2.1). Genel olarak laboratuvar koşullarında plazma, iki metal elektrot arasında duran ya da akan bir gaza elektrik enerjisi uygulandığında üretilir ve bu gaz molekülleri ile elektrik alan nedeniyle oluşan serbest elektronların çarpışmalarıyla gaz moleküllerinin iyonizasyonu ile oluşur. İyonlaşmış gaz 1-10 eV arasında düşük enerjide ve 10^{10} cm^{-3} kadar düşük elektron yoğunlukta oluşursa plazma, "Soğuk Plazmalar" olarak adlandırılır (Friedrich ve Meichsner, 2022). Soğuk plazmalarda elektronlar ve ağır türler (iyonlar, nötral ve uyarılmış atom ya da moleküller, radikaller) arasında termodinamik bir dengesizlik vardır. Elektronlar, iyonlardan ve nötr moleküllerden çok daha hafif olduğu için aralarındaki sıcaklık (ortalama kinetik enerji) farklıdır ve toplam enerjinin sadece küçük bir kısmı çarpışmalar sırasında değiş tokuş edilir. İyonların ve yüksüz moleküllerin soğuması (enerji kaybetmesi) elektronların enerji transferinden daha baskındır ve bu nedenle plazması yapılan gaz, düşük sıcaklıkta kalır (Keudell ve Gathen, 2017). Soğuk plazma teknolojisi, tıbbi cihazlar, tekstil, otomotiv, havacılık, elektronik, ziraat, biyomedikal, tıp, gıda ve ambalaj malzemeleri gibi birçok imalat endüstrisinde önemli kullanımları bulunmaktadır.

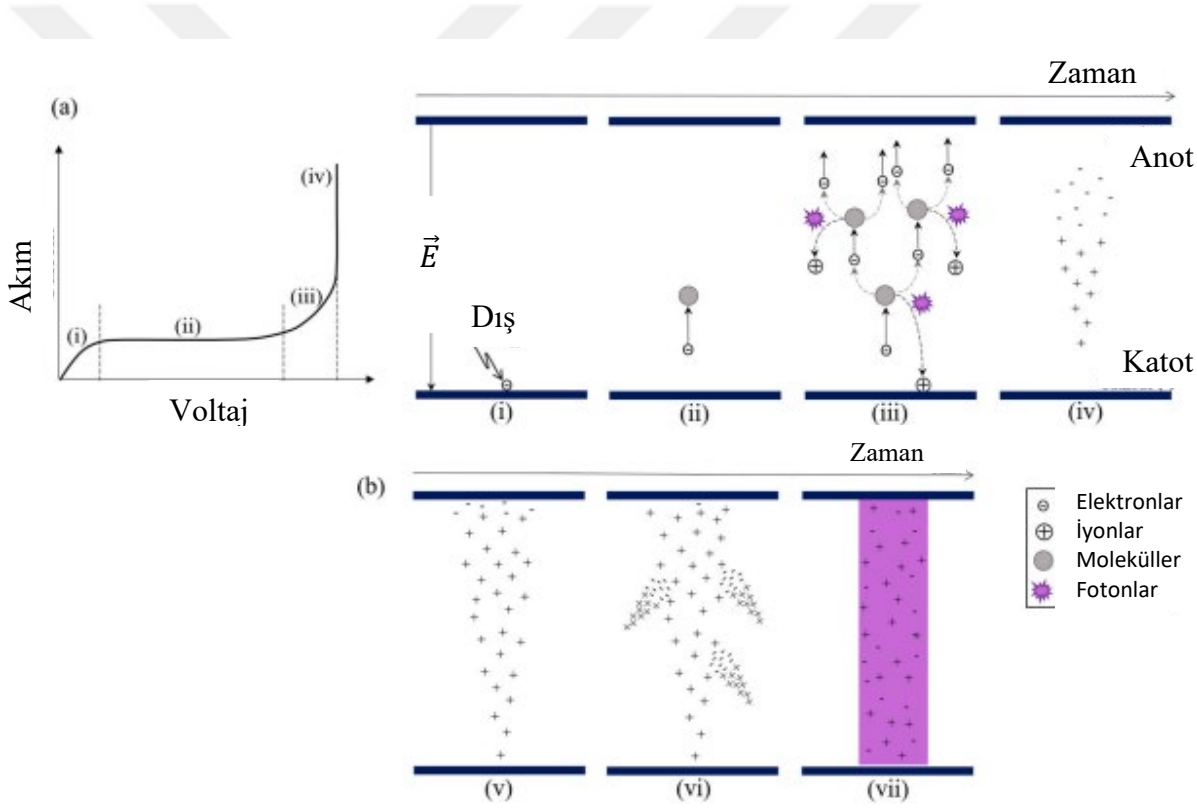


Şekil 2.1 Plazmanın farklı türleri (Ripin vd., 1977).

Plazmanın oluşması sırasında veya bir gazın elektronlar için iletken olmayan bir ortamdan iletken bir ortama dönüşmesi için ateşlenme (breakdown) ve çığ (avalanche) mekanizmaları temel olgulardır ve plazmanın oluşum sürecinin anlaşılması için gereklidir. Plazma içinde elektronların ve diğer yüklü parçacıkların bir çığ gibi giderek artan süreci, bir başka deyişle gazın ateşlenme süreci, Townsend Teorisi ile açıklanmaktadır. Gerek düşük basınçta gerekse atmosferik basınçta iki metal elektrot arasına yerleştirilen bir gazda her zaman bir miktar elektron bulunur. Bu elektronlar katot yüzeyinden, ortamdan gelen ışıkla fotoelektrik olay ile salındığı gibi ortamda bulunan kozmik ışınlar gibi gazın çok az iyonlaşması ile de oluşabilir. İki metal elektrot arasına elektrik enerjisi uygulandığında Townsend teorisine göre katot civarındaki elektronlar uygulanan elektrik alana zıt yönde Şekil 2.2'deki gibi anota doğru hızlanır. Townsend teorisine göre, i.) Elektrotlar arasına uygulanan elektrik alan yeterince yüksek ise katot civarında anota doğru yönelen elektronlar oluşur. Elektrotlar arasına uygulanan voltaj artmaya devam ederse elektrotlar arasında taşınan akım bir doyum noktasına ulaşana kadar artar. ii.) Uygulanan voltaj arttırılmaya devam edilse dahi akım sabit bir değerde kalır. Ortamda bulunan elektronlar sadece anota doğru taşınır. Bu durumda parçacıklar arası çarpışmalar elastiktir ve herhangi birinin iç enerjisini değiştirmez. Çok küçük miktarda iyonlaşmalar olabilir (Laroque vd.,2021). iii.) Elektrotlar arasına uygulanan voltaj arttırılmaya devam edilirse gaz molekülleri ile çarpışmalar yapan elektronlar onları iyonlaştıracak kadar yeterli enerjiye sahip olur ve inelastik bu çarpışmalar ile iyonlaşmalar sonucu ortamda yüklü parçacık sayısında küçük artış olmaya başlar. Bu yeni üretilen yüklü parçacıklarda uygulanan elektrik alanda hızlanarak hem başka yüklü parçacıkların oluşumuna neden olur hem de elektrotlar arası akım giderek yükselir. iv) Elektronlarla gaz molekülleri ve diğer parçacıkların çarpışmasıyla oluşan yüklü parçacık sayısı giderek çığ şeklinde artarak uygulanan voltaj arttırılmasa dahi elektrotlar arasından şiddetli akım geçişi olur. Bu aşama gazın ateşlenmesi (breakdown) ya da gazın plazma haline geldiği hal olarak adlandırılabilir. Daha az kütle ve daha yüksek hız nedeniyle elektronlar (10^5–10^6 m/s) çığın başında daha çok bulunurken pozitif iyonlar (50-500 m/s) çığın kuyruk bölgesinde hareket eder (Laroque vd.,2021). Katot bölgesinde iyonlar katottan daha fazla elektron sökmeye devam ederek iç paydaş olaylardaki enerji kayıplarını karşılar.

Yukarıdaki sürecin sonunda düşük basınçlarda oluşan plazma genelde glow (parlak ya da ışıldamalı) deşarj olarak oluşur. Bununla birlikte, Şekil 2.2b'de gösterildiği gibi,

atmosferik basınçta filamentli bir görünüme sahip bir şerit (streamer) deşarjı oluşturulabilir. Bu tip boşalma, (v) anot elektronları yakaladığında meydana gelir ve elektrotlar arasında bir pozitif iyon hacmi (uzay yükü) oluşturur. İyonlar serbest elektronlarla yeniden birleşir ve fotonlar yayılır, bu da yakındaki gaz fotoiyonizasyonuna neden olur ve daha fazla elektron üretir. Böylece yeni çığlar oluşur (ikincil çığlar). vi.) İkincil çığlar, elektronlar pozitif iyonlarıyla yeniden birleştiği için ana çığa katılır. vii.) Fotonların serbest bırakılması ve yeni çığların oluşumuyla, şerit (streamer) olarak bilinen oldukça iletken bir kanal oluşturan ardışık ve hızlı bir süreç meydana gelir. Bu şerit halindeki deşarjlar mikro kalınlıklarda olduğu için mikrodeşarjlar olarak da adlandırılır (Laroque vd., 2021).



Şekil 2.2 a.) Gaz deşarj sürecinde voltaj akım grafiği, **b.)** Townsend ve **c.)** Şerit (Streamer) teorisine göre gazın ateşlenerek plazma oluşum süreci (Laroque vd., 2021).

Townsend'in teorisi, gaz ateşlenmesini tanımlamak için Paschen yasasını ortaya koymuştur. Paschen yasası, belirli bir gaz için iki elektrot arasındaki bir plazmayı ateşleme için gerekli voltajın gaz basıncı (p) ve elektrotlar arası uzaklık (d)'ın çarpımına bağlı olduğunu tanımlar. Bu voltaj, hacimsel elektron çığları ile oluşturulan elektronlar ile

yüzeylerde elektron kayıpları olan ikincil elektron emisyon süreçleri arasında bir dengeyi sağlar. pxd çarpımının düşük değerleri için, meydana gelen az çarpışma nedeniyle ateşlenme voltajı yüksektir ve bu nedenle plazma üretmek için daha fazla enerji gereklidir. Yüksek pxd çarpımı değerleri için, parçacıkların çarpışmalar sırasında kolayca enerji kaybetmesi nedeniyle yine gazı ateşleme için uygulanması gereken ateşlenme voltajı yüksek olur. Farklı gazlar için p ve d eğrisinin şekli benzerdir ve 130-1300 Paxcm aralığında bir minimum pxd değeri sunar (Boris, 2015).

Soğuk plazmalar 10^{-3} kadar düşük basınçlarda üretilebilmektedir. Bu üretim aşamasında genelde paslanmaz çelikten yapılan bir vakum odası, vakum ölçüm cihazları ve vakum pompaları gerekmektedir. Gerek vakum odasına elektrotların yerleştirilmesi gerekse vakum aparatlarının bağlanması için çok iyi sızdırmazlık çalışmaları da yapmak gerekmektedir. Bu süreçler oldukça pahalıdır ve zorluklar içerir. Bununla birlikte düşük basınçlarda uygulama yapmak için vakum odasının kapağının açılıp kapanması ve tekrar vakum yapılması hem zaman kaybına neden olmaktadır hem de pratik olmamaktadır. Bu olumsuzluklar seri uygulamalar yapılmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle vakum gerektirmeyen atmosfer basıncında üretilen plazmalar teknolojik uygulamalarda önem kazanmaktadır. Atmosfer ortamında plazma üretiminin vakum ortamına göre ucuz ve pratik olmasının yanında gaz olarak atmosferik havanın kullanılabilmesi de hem maliyet hem de kullanım kolaylığı sağlamaktadır. Atmosfer ortamında plazma üretmek için korona deşarj, plazma jet ve dielektrik bariyer deşarjlar (DBD) yaygın kullanılan sistemler olmasına rağmen en yaygın kullanım DBD plazmalarıdır. Hacim DBD (HDBD) veya yüzey DBD (YDBD) olmak üzere iki tür dielektrik bariyer boşalması vardır.

2.2. Hacim Dielektrik Bariyer Deşarj

Herhangi bir DBD plazması, glow deşarjlar gibi iki metal elektrot arasına uygulanan yüksek voltajla üretilir (Ollegott vd., 2020). Elektrotlardan biri veya her ikisi, polimer, cam, kuvars veya seramik gibi bir dielektrik malzeme ile kaplanır ve 0,1 mm ila birkaç santimetre arasında değişen değişken bir boşlukla (genelde atmosferik hava) ayrılır (Ollegott vd., 2020). DBD çalışması için tipik parametreler; **i)** gaz basıncı 1×10^4 ve 1×10^6 Pa arasındaki basınçlar, **ii)** 10 kHz ile 50 MHz arasında değişen frekans bandı, **iii)** 1 ile

100 kV arasında salınan voltaj genliği ile alternatif akım (AC) veya darbeli doğru akım (DC) şeklinde genel olarak sıralanabilir. Elektrotlar arasında yalıtkan dielektrik katmanların varlığı nedeniyle, DBD sürekli (DC) voltajla üretilemez ve genelde bir AC voltajı ile ateşlenebilir ve sürdürülebilir. Pozitif voltaj yarı döngüsünde veya negatif voltaj yarı döngüsünde, voltaj potansiyelinin değişiminin taşıyıcı gazın bozulma eşiğini aştığı noktada en az iki deşarj oluşturulabilir. Bu nedenle, DBD plazması süreksiz (kesikli) bir plazma olarak kabul edilir. Elektrotta uygulanan voltajın hızlı bir şekilde değişmesinin, elektrik alanı boyunca dielektrik katman içindeki yüklü türlerin ayrılmasından kaynaklanan dielektrik bariyerin polarizasyonuna yol açacağı bilinmektedir. Bu polarizasyonla oluşan yüzey sıralı yükler, uygulanan elektrik alanına ters bir elektrik alanı oluşturacak ve bir yer değiştirme akımının oluşmasına yol açacaktır. Polarizasyon yoğunluğu P, deşarj homojen moddayken ve elektrik alanı E doğrusal olduğunda,

$$P = \varepsilon_0 X_e E \tag{2.1}$$

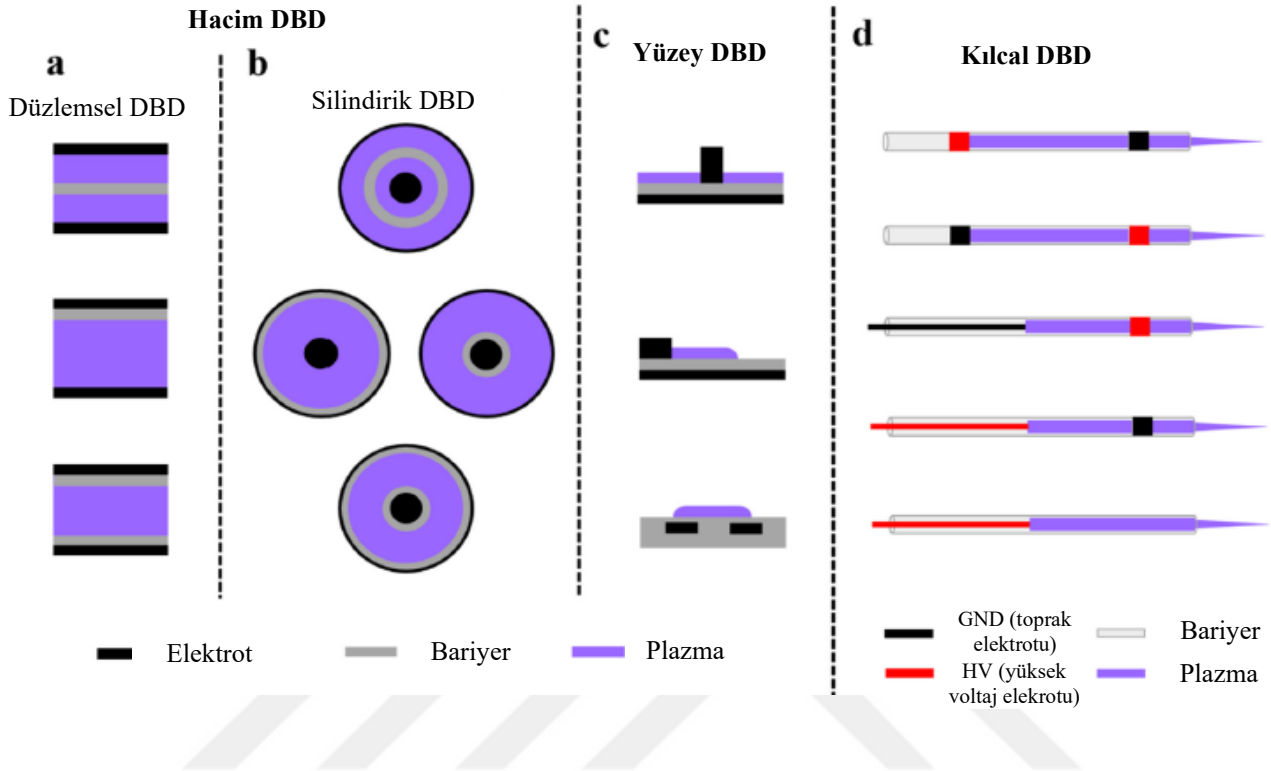
olarak ifade edilebilir. Denklemde, ε_0 vakumun elektrik geçirgenliğidir ve X_e, malzemenin polarize olma kapasitesini gösteren, dielektrik malzemenin elektrik duyarlılığıdır.

$$X_e = \varepsilon_r - 1 \tag{2.2}$$

elektrik geçirgenliğidir ve ε_r materyalin relative dielektrik sabitidir (Niu vd., 2021).

Yukarıda bahsedildiği gibi, bir plazma kaynağının DBD olarak tanımlanması için evrensel bir kriter, elektrotlar arasına en az bir dielektrik bariyer yerleştirilmesidir. DBD konfigürasyonunda, dielektrik bariyerin iki fonksiyonel görevi olmaktadır. Birincisi, elektrot ile üretilen plazma arasındaki teması önler ve ikincisi bu plazma yüklü parçacıklarının elektrota ulaşamaması durumu ile yüksek akım yoğunluklarında kıvılcım (spark) deşarjı oluşumunu engeller. Farklı uygulamaların gereksinimlerini karşılamak için Şekil 2.3'te gösterildiği gibi çeşitli DBD plazma konfigürasyonları kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan DBD deşarjlar, elektrotların göreceli konumuna göre hacim DBD'si (hacim deşarjları), yüzey DBD'si (yüzey deşarjları) ve kılcal (capillary) DBD şeklinde üçe ayrılır. Hacim deşarjları elektrotlar arasında oluşan kapalı bir alanda ateşlenen

deşarjlardır (Şekil 2.3a ve 2.3b), yüzey deşarjı ise bariyerin yüzeyinde meydana gelir (Şekil 2.3c) (Niu vd., 2021).

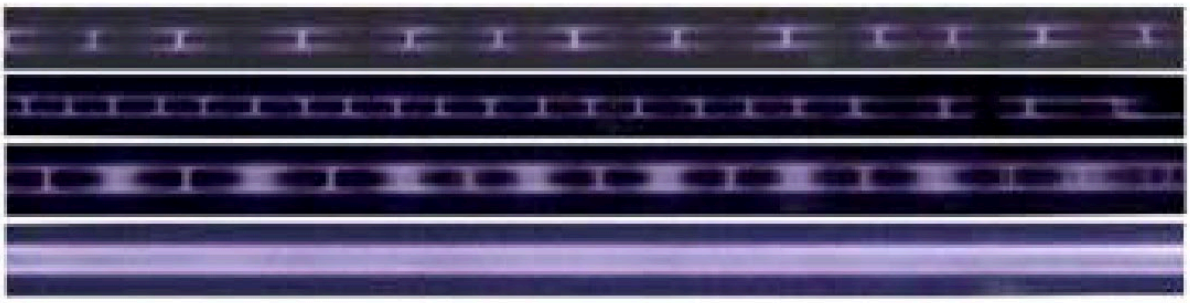


Şekil 2.3. DBD konfigürasyonlarının şematik gösterimleri (Niu vd., 2021).

Özellikle hacim deşarjlarının yaygın olarak kullanılan yapıları, düzlemsel ve silindirik konfigürasyonda olmaktadır. Şekil 2.3a ve 2.3b'de gösterildiği gibi, dielektrik katman ya her iki elektrot arasında temassız olarak uzanır ya da en az bir elektrotu kaplar. Her iki elektrot da kaplandığında elektrotlar ve plazma arasında temas olmadığında tam dielektrik bariyer deşarjı, diğerleri yarım dielektrik bariyer deşarjı olarak adlandırılabilir. Yarım dielektrik bariyer boşalması durumunda, bir elektrot bir yarım döngü sırasında plazma ile doğrudan temas halinde olduğunda, bir doğrudan boşalma başlatılacak ve dielektrik bariyer boşalmasının üzerine bindirilecektir. Silindirik DBD kurulumu esas olarak merkezi bir elektrottan oluşur ve elektrotlar arasında en az bir silindirik dielektrik bariyer tüpü bulunan ikinci bir koaksiyel elektrottan oluşur. Silindirik DBD düzeneği (Şekil 2.3b), büyük hacimli kapalı bir boşaltma alanı oluşturabilir, bu da onu gaz dönüştürme uygulamalarında ve plazma katalitik reaksiyonları alanında avantajlı kılar. Yüzey deşarjı, bariyerin yüzeyinde oluşur ve yüzey boyunca yayılır (Şekil 2.3c). Kapiler DBD, mikro boyutu ve mükemmel analitik performansı nedeniyle özellikle analitik

kimyada çeşitli alanlarda geniş uygulama alanı bulmuştur. Şekil 2.3d, halka halka, pim halka veya tek pimli konfigürasyonlarda yaygın olarak kullanılan kılcal DBD'yi gösterir. Halka halka ve pim halka DBD için, pozitif deşarj döngüsü sırasında plazma jeti, erken plazma ve çakışan plazma gibi farklı plazmalar oluşur (Niu vd., 2021).

Dielektrik bariyer deşarjları (DBD'ler), belirli koşullar altında, atmosferik basınçta filamentli mod ve homojen mod olmak üzere iki ana çalışma modunda gerçekleştirilebilir. Şekil 2.4'te elektrotlara uygulanan voltaj arttıkça filament deşarjların homojen deşarja dönüşümü görülmektedir. Filamentli DBD'ler, genellikle uzayda ve zamanda değişken olarak dağıtılan geçici mikro deşarjlar (MD'ler) ile karakterize edilir. Bu deşarjlar homojen olmayan işleme ile sonuçlanır ve tekdüzeliğin ana yönü olduğu yüzey işlemleri gibi uygulamalar için daha az işlemle sonuçlanır. Homojen bir boşalma, öncekinin sağladığı tekdüzelik nedeniyle filamentli bir boşalmadan hala avantajlıdır. Filamentli deşarjdan farklı olarak, homojen bir deşarjın deşarj parametreleri çeşitli yollarla hem mekansal hem de zamansal olarak kontrol edilebilir (Guikema vd., 2000).

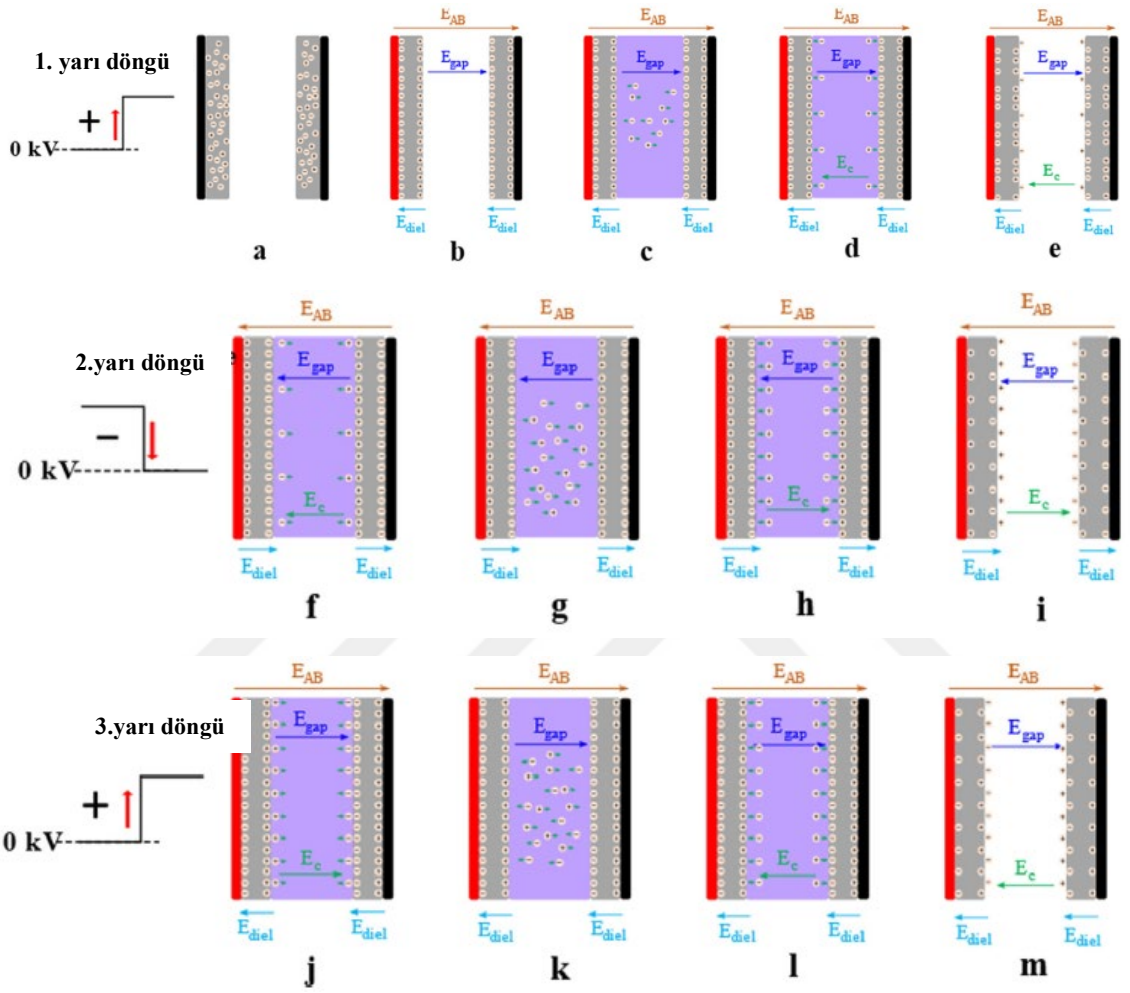


Şekil 2.4. DBD'da mikro deşarjların görünümü ve uygulama voltajının artmasıyla hacimsel deşarja evrilmesi (Δd=2mm) (Guikema vd., 2000).

2.3. Düzlemsel Bir Konfigürasyon Temelinde DBD Plazmasının Fiziği

Uygulanan AC voltajı nedeniyle, DBD kesikli bir deşarjdır ve deşarj yalnızca belirli koşullar altında belirli bir gaz için belirli bir voltaj değerinin üstünde olduğunda gerçekleşir, bu da yarım döngü başına en az bir deşarj işleminin beklendiği anlamına gelir. Deşarj (Boşalma) işlemi, her yarım döngüde en az bir ateşleme (plazma) ile karakterize

edilir ve plazma kısa bir süre sonra (mikrosaniye ölçeği) sona erer. Her elektrotun bir dielektrik katmanla kaplandığı deşarjın ilk üç yarım döngüsünün ateşlenmesi, bir düzlemsel DBD konfigürasyonu ve bir kare dalga voltajı uygulaması temelinde Şekil 2.5'te gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Düzlemsel bir DBD konfigürasyonunda ilk üç yarım döngüde plazma gelişiminin şematik diyagramı (Niu vd., 2021).

İki elektrot arasındaki mesafe d'dir. Elektrotlara voltaj uygulanmadığında, pozitif ve negatif yükler dielektrik bariyerde rastgele dağılır (Şekil 2.5a). İlk yarı döngü, uygulanan voltaj U_{AB}'nin pozitif bir eğimi ile başlar ve yüksek voltaj (HV) elektrotu ile toprak elektrotu (GND) arasında bir U_{AB} oluşturur. U_{AB} ve E_{AB} aşağıdaki denklemde gösterildiği gibi yazılabilir:

$$U_{AB} = \int_A^B \vec{E}_{AB}\vec{d} = E_{AB}d \tag{2.3}$$

Elektrik alan dielektrik bariyer ve deşarj aralığı boyunca dağılır.

$$\int_A^B \vec{E} d\vec{S} = \vec{E}_{AB}\vec{d} = E_{AB}d \tag{2.4}$$

Elektrik alanı dağıtılacak bariyeri ve boşaltma boşluğu boyunca polarizasyon etkisinden dolayı, kalıp elektrik bariyerindeki dipoller hizalanacak ve uygulanan elektrik alanın zıt yönünde bir elektrik alana yol açacaktır. (şekil 2.5b). Bu nedenle deşarj aralığı boyunca etkili elektrik alanı:

$$\left|\vec{E}_g\right| = \left|\vec{E}_{AB} + 2\vec{E}_d\right| = E_{AB} - 2E_d \tag{2.5}$$

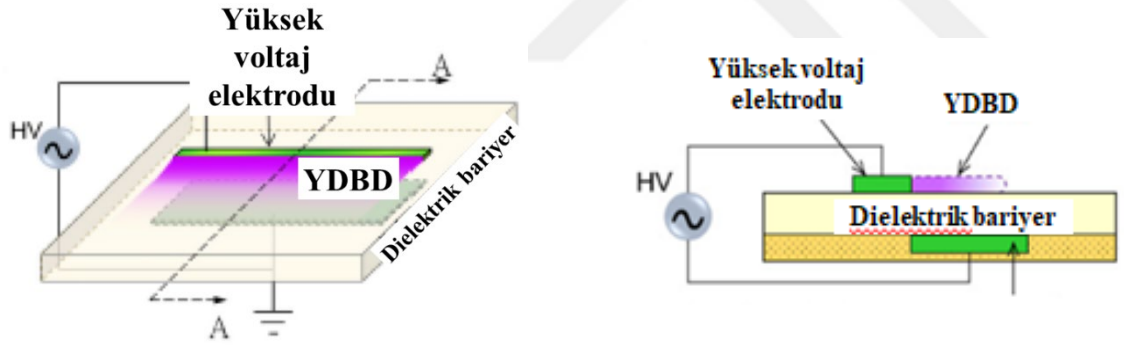
ile ifade edilebilir. Boşluktan akan gazın ateşlenme değerinin ötesine geçtiğinde deşarj oluşur (şekil 2.5c) ve iyonlar, enerjik elektronlar, nötr atomlar ve moleküller arasındaki çarpışmalarla üretilecektir. Bu yüklü türler çekilecek ve dielektrik yüzeyde birikecek, bu da $\overrightarrow{E_c}$ aralığı boyunca yönü $\overrightarrow{E_g}$ nin tersi olan başka bir elektrik alanıyla sonuçlanacak (şekil 2.5d) ve bu nedenle boşluk boyunca etkili elektrik alanını azaltacaktır. Yükler dielektrik bariyerin yüzeyine bağlandığında karşılık gelen dielektrik kısmen depolarize olacaktır (Şekil 2.5e). Yüklerin birikmesiyle birlikte $\vec{E}$ kademeli olarak artar. Bu da $\vec{E}$'nin plazmayı sürdürmesi gereken elektrik alanından daha küçük olmasına neden olur, yüklü türler kalıbın yüzeyinde kalırken plazma sönecektir (Şekil 2.5e). İkinci yarı döngü uygulanan (U_{AB}) geriliminin negatif eğimi ile başlar. (Şekil 2.5f ve 2.5i) ile benzer bir süreç gözlemlenecektir. Yüksek voltajlı elektrot polaritesini değiştirdiğinden boşluk boyunca elektrik alanın yönünü değiştirir ve boşluk boyunca ilk yarı döngüde $\vec{E}$' yi azaltan $\vec{E}$ artık deşarj sürecini desteklemektedir ve $\vec{E}$;

$$\left|\vec{E}\right| = \left|\vec{E}_{AB} + \vec{E}_C + 2\vec{E}\right| = E_{AB} + E_C - 2E \tag{2.6}$$

olarak tanımlanabilir. Daha güçlü elektrik potansiyel nedeniyle daha yoğun bir elektrik alan meydana gelir. Daha fazla yük üretilecek ve kalıp elektrik bariyerinin yüzeyine bağlanacaktır. Plazma elektrot yüzeyinde artan boşluk yükü miktarı nedeniyle söner. Daha sonra üçüncü yarım döngü başlar ve yüklerin bağlanması yeniden yönlendirilmesi gibi işlemler gerçekleşir (Şekil 2.5 j → Şekil 2.5 m) (Niu vd., 2021).

2.4. Yüzey Dielektrik Bariyer Deşarj

Yüzey dielektrik bariyer deşarjı (YDBD) plazması, dengede olmayan bir soğuk plazma türüdür (Bednar vd., 2013; Portugal vd., 2022). Tipik olarak asimetrik olarak yerleştirilmiş iki metal elektrot ve bir dielektrikten oluşur. Yeterince yüksek voltajlar, metal elektrotlar arasına uygulandığı zaman dielektrik yüzeyinde hava iyonize olur ve plazma oluşur. En genel YDBD plazması üretim şematiği Şekil 2.6a'da verilmiştir. YDBD'de elektrotlardan herhangi biri ile dielektrik bariyer arasında boşluk yoktur. Sonuç olarak, deşarjlar bariyerin yüzeyi üzerinde ve çevreleyen gaza maruz bırakılan elektrotun sınırı boyunca neredeyse iki boyutlu bir dağılım elde eder. Alt elektrot genellikle topraklanır ve YDBD jeneratörünün o tarafında olası plazma oluşumunu önlemek için ek bir dielektrik malzeme katmanına gömülür (Şekil 2.6b) (Portugal vd., 2022). Yüzey mikro deşarjları, dielektrik yüzey üzerinde veya yüzey boyunca genişleyen korona lekeleri ya da flamentler olarak ortaya çıkar (Portugal vd., 2022).



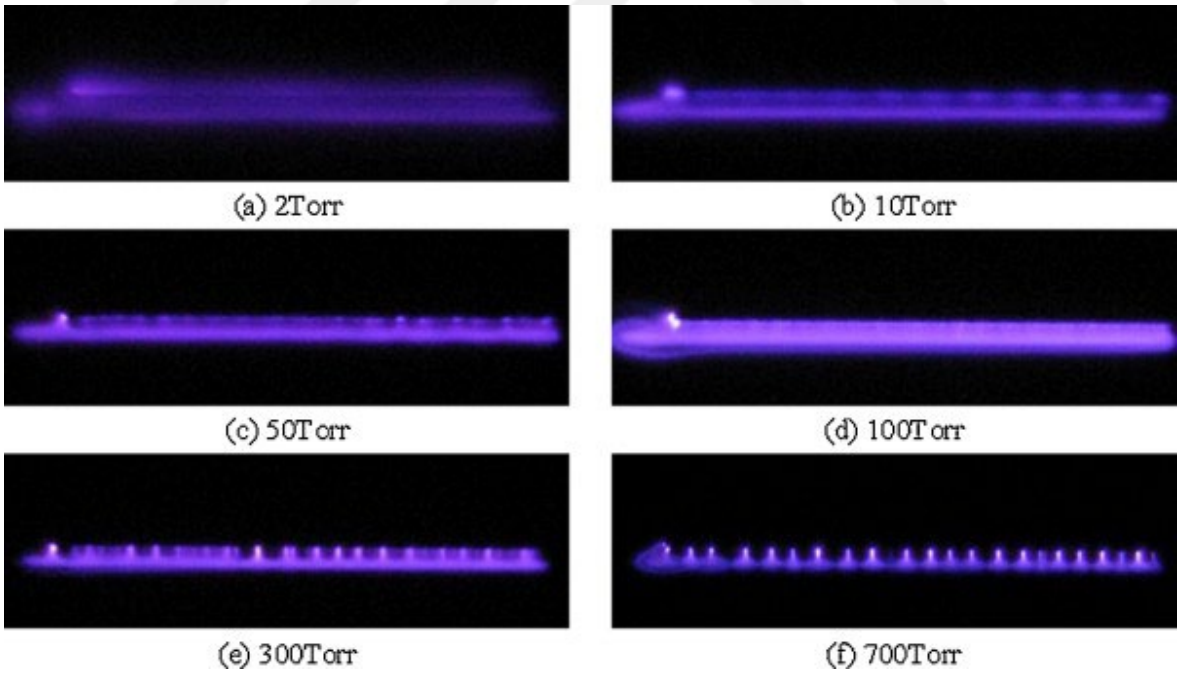
(a) **(b)**

Şekil 2.6. YDBD şematik gösterimi (Portugal vd., 2022).

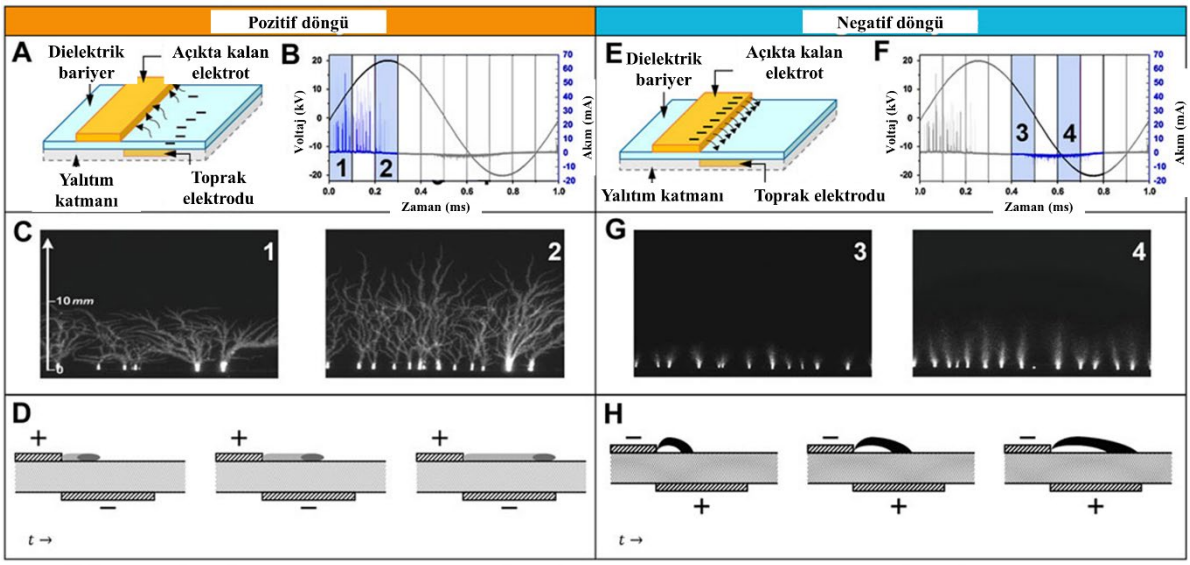
Herhangi bir mikro deşarjın kısa bir süresi vardır çünkü bariyerin yüzeyindeki yük birikimi (tükenmesi), yerel elektrik potansiyelini yavaş yavaş bozulma eşiğinin altındaki seviyelere düşürür. Uzaktan, YDBD bütün bir parlaklık izlenimi verir. Ancak yoğunlaştırılmış cihaz (ICCD) görüntüleri, pozitif ve negatif voltaj türevleri için çok farklı deşarj özellikleri ortaya çıkarır. Gerilim dalga biçiminden bağımsız olarak, bir negatif gerilim eğimi, deşarjların açıkta kalan elektrotun kenarından kaynaklanan ve bir tüy şeklinde dielektrik yüzey üzerinde uzanan çok sayıda negatif korona noktasından oluştuğu

bir yayılma veya ışıma rejimini indükleyecektir. Oysa pozitif bir eğim, dalları dielektrik yüzeyi ile sürekli temas halinde değişken olarak yayılan flamalar indükleyecektir (Portugal vd., 2022).

Şekil 2.7'de bir AC mikro deşarjına karşılık gelen YDBD morfolojisini göstermektedir ve burada plazma hacmini oluşturan mikro deşarjlar, voltaj dalgasının her bir döngüsünün yalnızca belirli kısımlarında mevcuttur (Portugal vd., 2022). Görüldüğü gibi düşük basınçta yaygın moddaki plazma yüksek basınçta flamentel yapıda kalmaktadır. Şekil 2.8'de pozitif ve negatif voltaj döngüsünde YDBD plazmasının evrimi görülmektedir. Bu şekilde A: Negatif gidişli döngü sırasında deşarj değişiminin şeması, B: Pozitif yarı döngüde YDBD'nin akım-voltaj karakteristiği, C: Plazmanın gelişmesi, D: Deşarjın zamanla genişlemesinin şematik gösterimi, E: Pozitif gidişli döngü sırasında deşarj değişiminin şeması, F: Negatif yarı döngüde YDBD'nin akım-voltaj karakteristiği, G: Plazmanın gelişmesi, H: Deşarjın zamanla genişlemesinin şematik gösterimidir (Wu vd., 2013).

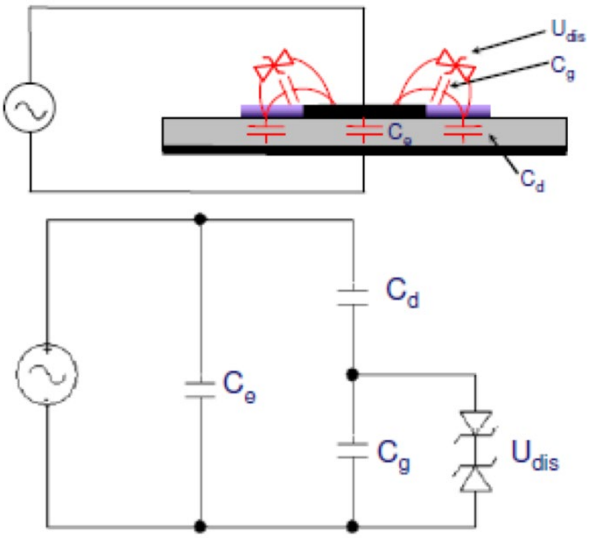


Şekil 2.7. Farklı basınçlarda YDBD plazmaları (Δd=1mm) (Wu vd., 2013).

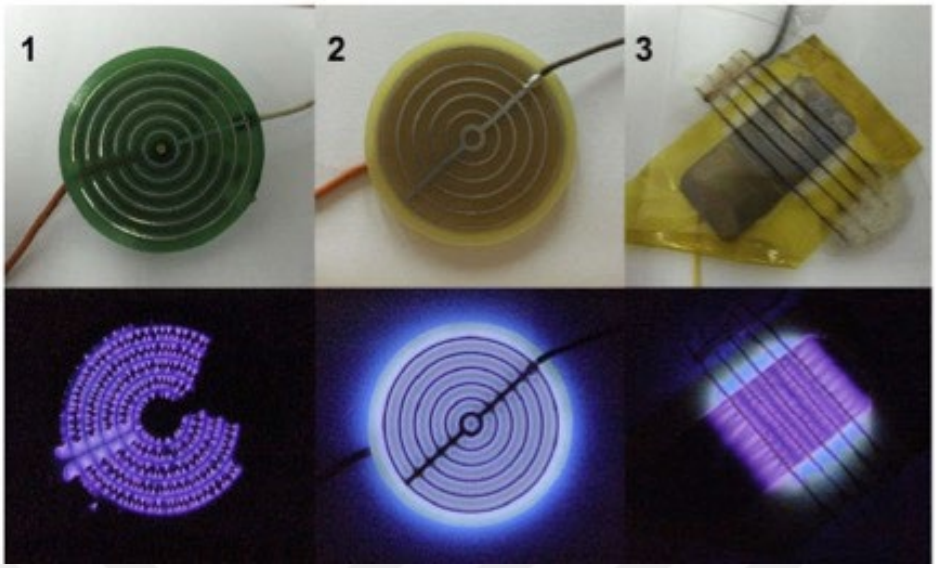


Şekil 2.8. YDBD deşarjın pozitif ve negatif yarı döngüde gelişimi (Portugal vd., 2022).

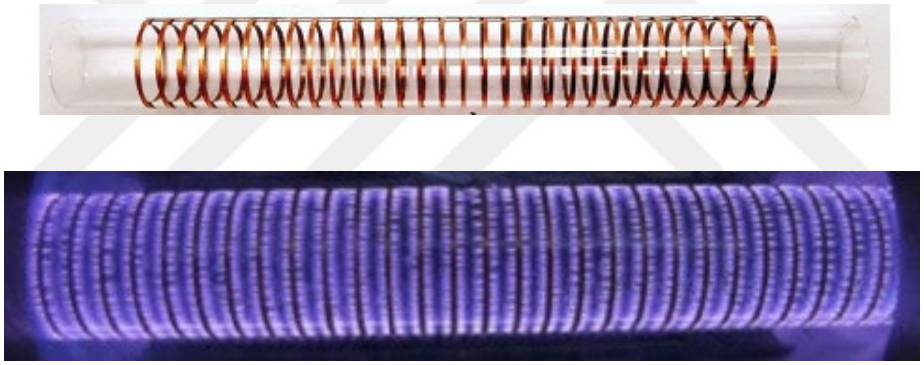
Bir AC YDBD plazmasının eşdeğer devresi de Şekil 2.9'da verilmiştir. Görüldüğü gibi Dielektrik tabakalar ve hava ortamı birer kapasitör olarak davranmaktadır. Şekil 2.10'da farklı geometrilerde üretilen YDBD fotoğrafları verilmiştir. Genelde ozon üreteci olarak kullanılan bu sistemler düşük voltaj ile mikrodeşarj sayısını arttırmak için farklı geometrilerde üretilmektedir.



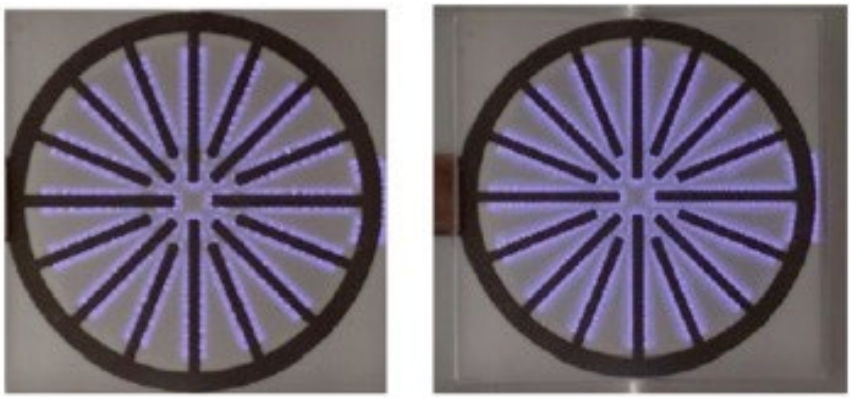
Şekil 2.9. Bir AC YDBD plazmasının eşdeğer elektriksel modeli.



a.



b.



c.

Şekil 2.10. Farklı geometrilerde üretilen YDBD plazmaları **a.)** (Bednar vd., 2013), **b.)**(Pekárek vd., 2021), **c.)** (Pekárek, 2012).

YDBD'ye olan ilginin artmasının ve plazmanın deşarj ile topraklanmış elektrotlar arasındaki hacimde üretildiği geleneksel dielektrik bariyer deşarjından (DBD) daha verimli hale gelmesinin nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir: *(1)* uygulanan voltajın azaltılması ve güç verimliliğindeki artış (Shimizu vd., 2010); *(2)* plazma kanallarının yüksek sıcaklığı veya plazma bölgesindeki reaktif türlerle çarpışmalar nedeniyle ozonun tahrip olmadan birikmesine izin veren plazma bölgesi üzerindeki boş alanın mevcudiyeti (Masuda vd., 1988); *(3)* hacimsel DBD'ninkini aşan reaktif türler üretmek için yüksek enerji verimliliği (Malik vd., 2015; Malik vd., 2011); ve *(4)* soygaz katkısı gerektirmeden ortam havasında çalışma (Pavlovich vd., 2014).

Bazen yüzey mikrodeşarjı (YMD) olarak da adlandırılan yüzey dielektrik bariyer deşarjı (YDBD), farklı uygulamalarda önemli ölçüde dikkat çekmektedir. Aerodinamik akış kontrolü (Benard ve Moreau, 2014) ve aerosollerin şarj edilmesi (Hozumi vd., 2009) için iyon üretim sürecinde etkili bir şekilde uygulanmaktadır. Ayrıca ozon üretimi (Malik, 2014; Malik vd., 2015; Jodzis, 2011), NOx dönüşümü (Malik vd., 2014), VOC'lerin ayrıştırılması (Abdelaziz vd., 2014; Seto vd., 2005), mikroorganizmaların inaktivasyonu ve bakterilerin öldürülmesi (Jeon vd., 2014; Maisch, 2012; Morfill vd., 2009; Jeon, 2014) ve su arıtımı (Barjasteh vd., 2021) gibi birçok çevresel uygulamada plazma bazlı kimyasal reaktör olarak YDBD'ler kullanılmaktadır.

L. monocytogenes'inde incelendiği bir çalışmada, YDBD sistemlerinde birim uzunluk başına daha düşük güç kullanarak *L. monocytogenes*'de önemli bir azalma gözlemlediler. Bu gözlem, YDBD cihazının tasarımının, reaktif türleri etkilenen hava akışıyla uzak yüzeylere yönlendiren rolünün bakteri inaktivasyonunda önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Bu çalışmada elde edilen bulgular, düşük güç ve daha büyük bir plazma hacminin, sterilizasyon ve dekontaminasyon için daha etkili bir yaklaşım sunabileceğini göstermektedir ve bu, YDBD plazma tarafından indüklenen eukaryotik oksidatif stres ve bakteri inaktivasyonunda reaktif oksijen türlerinin (ROT) önemini vurgulamaktadır (Pai vd., 2018). Örneğin, (Kasa vd., 2023) tarafından yapılan bir çalışmada, kontrol bakteri kolonlarının sayısı 4,09 x 10^7 koloni oluşturan birim (CFU)/mL iken, *E. coli*'nin YDBD plazmaya 15 mm uzaklıktan 120 saniye maruz kaldığında ortalama büyüyen koloni sayısı 2,53 x 10^7 CFU/mL olarak bulunmuştur. Bununla karşılaştırıldığında, kendi çalışmamız aynı süre zarfında aynı mesafeden bile oldukça

yüksek bakteri öldürme etkisi gözlemledi. Başka bir çalışmada, YDBD plazma tedavisi 600 saniye boyunca *E. coli* ve *S. aureus* için sırasıyla 3,10 ve 3,42 log azalma sağladı (Guo vd., 2022). Ancak kendi çalışmamızda, tüm *E. coli* ve *S. aureus*'un YDBD plazma ile 600 saniyede inaktive edildiği gözlemlendi.

Al_2O_3 yalıtım plakası (0,25 mm kalınlığında), bakır (3,0 µm kalınlığında) ve kalay (1,0 µm kalınlığında) kaplı yüksek voltajlı bir elektrot, ve düzgün paslanmaz çelik tel elektrot (1.4310 temel malzeme, 0,5 mm kalınlığında, kare şeklinde) içeren bir YDBD reaktörü, *E. faecalis* üzerinde 7 log azalma sağladı (Theinkom vd., 2019). Bir başka YDBD sistemi, H_2O_2/H_2O buharlarını karışım şişesinden plazma reaktörüne aktarmak için bir taşıyıcı olarak argon gazı kullandı. Bu işlem, numunelerin 4,2 W'de 420 saniye boyunca YDBD plazma ile tedavi edildiğinde taze ananas suyunda *E. faecalis*'in 8,2-log azalmasına neden oldu (Sohbatzadeh vd., 2021). Soğuk plazmaların *E. faecalis* üzerindeki uygulaması genellikle plazma jet sistemleriyle gerçekleştirilirken, YDBD plazmaları literatürde pek gözlemlenmedi. *E. faecalis* diş çürüğü ve diş enfeksiyonları ile ilişkilidir ve kök kanal enfeksiyonlarının başlıca ajanlarından biridir. Diş hekimleri bu enfeksiyonları kök kanal tedavisi sırasında tedavi etmek için önlemler alır. Kök kanal tedavisi, dişin içindeki enfeksiyonları temizlemek ve enfekte olmuş dokuları çıkarmak için kullanılır. Bu prosedür sırasında kök kanalın sterilize edilmesi ve bakterilerin elimine edilmesi son derece önemlidir. Özellikle, diş hekimlerinin kullandığı araçların, diş implantlarının ve protezlerin sterilize edilmesi, *E. faecalis* kontaminasyonunu önlemek için hayati bir öneme sahiptir. Bu nedenle, YDBD plazma reaktörümüz, diş hekimlerinin araçlarını ve ekipmanlarını sterilize etmeleri için kullanışlı bir teknoloji olarak düşünülebilir (Akan ve Durmuş, 2023).

P. aeruginosa, Gram-negatif bir bakteri türüdür ve çevresel olarak yaygın olarak bulunur ve toprak, su ve bitkiler gibi çeşitli ortamlarda yaşayabilir. Bununla birlikte, zayıf bağışıklık sistemine sahip veya hastane ortamlarında bulunan kişilerde enfeksiyonlara neden olabilen potansiyel bir patojendir. *P. aeruginosa* bakterisi, doğal olarak antistafilokokal penisilinler gibi birçok yaygın antimikrobiyal ilaca karşı direnç gösterir. *P. aeruginosa*, genellikle hastane enfeksiyonları, özellikle zayıf bağışıklık sistemine sahip kişilerde ve ameliyat sonrası hastalarda ciddi enfeksiyonlara yol açabilir. Ayrıca akciğer enfeksiyonlarına, idrar yolu enfeksiyonlarına, deri enfeksiyonlarına ve yanıkların enfekte olmasına neden olabilir.

Gıda, tarım, diş ve tıp alanlarında pratik uygulamalar sunan AC voltaj avantajına sahip olan YDBD reaktörümüze kıyasla, daha önce geliştirilen YDBD sistemlerinin belirgin olarak daha küçük boyutlara sahip olduğu dikkate değerdir. Örneğin, bir çalışma, farklı domuz eti kesim parçalarında patojen inaktivasyon etkinliğini incelemek için 53 mm×113 mm boyutlarında yanal bir alumina seramiği altına yerleştirilmiş düzlemsel bir ağ elektrotunu kullanan bir YDBD sistemini kullanmıştır (Boonyawan vd., 2022). Başka bir çalışma, suşi çubuğu yüzeylerinde *E. coli* ve *C. albicans*'ı inaktive eden 80 mm uzunluğunda, 40 mm genişliğinde ve 10 mm yüksekliğinde bir YDBD sistemini kullanmıştır (Song vd., 2015). Farklı bir çalışmanın bir parçası olarak, yuvarlak bir alüminyum levha (40 mm çapında), paslanmaz çelik ağ (40 mm çapında, 60 mesh/cm^2) ve 1 mm kalınlığında seramik bir levha kullanılarak üretilen YDBD plazmanın, kriyojenik sıcaklıklardaki buz içinde *E. coli* üzerinde dezenfeksiyon etkisi incelenmiştir (Guo vd., 2021). Benzer şekilde, çoklu boşluklu YDBD'nin *E coli*, *S. Enteritidis* ve *B. subtilis*'e karşı etkililiğini değerlendirmek için 2×2 cm² plazma alanı kullanılmıştır (Mošovská vd., 2023). Farklı bir yaklaşımda, nemli hava içinde doğal olarak kontamine olmuş fesleğen tohumları, alumina levhanın karşı yüzeyinde 17 paralel şeritten (1 mm genişliğinde, 75 mm uzunluğunda) ve indüksiyon elektrodunun (74 mm × 74 mm) kullanıldığı bir YDBD ile tedavi edilmiştir (Ambrico vd., 2017). 100 μm kalınlığında ve 25 mm çapında bir dielektrik ile donatılmış bir YDBD sistem, mutasyonlu koloni sayısını artırmadan V79 fibroblastlarına YDBD plazmaya maruz bırakmıştır (Dijksteel vd., 2020). Başka bir inceleme, *Pseudomonas tolaasii* (*P.tolaasii*), polifenol oksidaz (PPO) ve peroksidaz (POD) enzimlerini devre dışı bırakmak için beş uzunlamasına ince aluminyum elektrot (280 × 20 × 0,075 mm) kullanan bir YDBD sistemini kullanmıştır (Pourbagher vd., 2021). Ayrıca, HUVEC, Neuroblastoma ve HepG2 gibi memeli hücreleri üzerinde soğuk plazmanın etkisini incelemek için 36 × 36 mm² toprak elektrotlu bir YDBD sistemi kullanılmıştır (Pai vd., 2015). Başka bir çalışmada, SW620 hücreleri üzerinde kullanılan 6 mm çapında yüksek voltajlı elektrotu, 3 mm çapında bir koaksiyel bakır çubuk içine yerleştirilen ve 0,5 mm kalınlığında bir yalıtıcı ile birlikte bulunan bir YDBD sistemi kullanılmıştır (Nupangtha vd., 2021). Son olarak, arpa (Hordeum vulgare) tohumları, 1 mm kalınlığında bir alumina seramik yalıtım ve 105 × 105 mm² elektrot alanına sahip bir YDBD sistemini kullanarak tedavi edilmiştir (Park vd., 2018). Yüksek hacimli YDBD plazma uygulamaları için oksijen, azot, hava veya nemlendirilmiş hava gibi seçenekler sunulabilir (Liu vd., 2022). Darbe voltajı uygulamak da bir alternatif olarak kabul edilir (Zheng vd., 2016).

Literatürde yukarıda sıralanan pek çok çalışma ile kıyaslandığında bu tez çalışmasında geliştirdiğimiz görece büyük hacimli YDBD plazma reaktörü, gıda, tarım, biyomedikal, diş ve tıp alanlarında kullanılmak üzere pratik bir cihaz olacaktır.

2.5. *Aspergillus sp.* Küfü Genel Özellikleri

Çürümüş meyveler, *Aspergillus sp.* küflerinin gelişmesi için ihtiyacı olan besin maddelerini sunan ideal ortamları oluşturur. *Aspergillus sp.* genellikle siyah olmak üzere farklı renklerde büyür. Bu mantar, çevresindeki kimyasal, biyolojik, fiziksel koşullara hızla adapte olarak büyür ve gelişir. Bu mantar, özellikle hasarlı meyvelerde en üst (dış) tabakasında bulunur aynı zamanda farklı genleri vardır (Saif vd., 2021). Tarım ürünü ve gıdalar, sıkça toksijenik küfler (mantarlar) tarafından kontamine olabilmektedir. *Aspergillus sp.*'nin neden olduğu mikotoksinler, tüketildiğinde bulanık görme, kanser, baş dönmesi, kusma, nörolojik bozukluk, ishal örnekleri gibi sağlık sorunlarına yol açabilir. Gıda ürünlerinde bulunan mikotoksinler, büyük bir sağlık riski oluşturmakla birlikte, genellikle göz ardı edilmektedir (Bhat, 2013).

Aspergillus sp. doğada sık görülen mantar türlerinden biridir ve fumonisinler, aflatoksinler, okratoksinler gibi mikotoksinler üretebilmektedir. *Aspergillus sp.* türleri ekonomik açıdan büyük öneme sahiptir. Nem seviyelerinde ve düşük su aktivitesinde (aw) gelişme yeteneğine sahip olan bu türler, tropikal bölgelerdeki yüksek sıcaklık ve bağıl nem koşullarına da tolerans gösterebilirler (Bhat, 2013).

Aspergillus sp. kuruyemişler, tahıllar, kuru meyveler, ekmek gibi unlu mamuller, meyve ve sebzeler, süt ve süt ürünlerinde sıkça bulunabilir (Tarım Ve Orman Bakanlığı, 2014).

Bu tez çalışmasında üretilen soğuk plazma YDBD sisteminde çilek, çeri domates, peynir ve ekşi mayalı ekmek gibi farklı gıdalar üzerine plazma uygulaması yapılmıştır. Gıdalara plazma uygulamasından sonra daha geç küflendiği görülmüştür. Bu sebeple doğrudan bir küf mikroorganizma üzerine bu çalışmada üretilen plazma sistemi ile soğuk plazma uygulaması yapılarak plazmanın küf mikroorganizmasına ne gibi değişim yaptığı

anlaşılmak istenmiştir. Bu sebeple soğuk plazma uygulanmamış ve soğuk plazma uygulanmış *Aspergillus sp.* mikroorganizmalarının FTIR analizleri yapılmıştır. Mikroorganizmaların FTIR analizleri sonuçlarının yorumlanması, son derece uzmanlık ve detaylı çalışmalar gerektirmektedir. Özellikle daha önce yapılan bilimsel çalışmalar referans olarak alınmalıdır. Bu sebeple *Aspergillus sp.* mikroorganizmalarının FTIR analizi yapan çalışmalar ve özellikle soğuk plazma uygulaması yapılmış *Aspergillus sp.* mikroorganizmalarının FTIR analiz sonuçları aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

Bir çalışmada, yer fıstığındaki proteinin fizikokimyasal özellikleri ve fungisit etkinliği, yüksek voltajlı atmosferik soğuk plazma (YVASP) ve ultraviyole-soğuk plazma (UVSP) uygulamalarıyla incelenmiştir. *Aspergillus flavus* (*A. flavus*) sporları, patates dekstroz agarı üzerinde inkübe edilip, %0,1 Tween 80 çözeltisiyle toplanmıştır. İşlem sonrasında yer fıstığı numuneleri, alkali asit çöktürme yöntemiyle hazırlanıp, çeşitli işlemlerden geçirilerek liyofilize edilmiştir. FTIR analizleri, protein yapısındaki değişiklikleri incelemek amacıyla yapılmış ve YVASP uygulaması, α-heliks yapısında bir azalmaya yol açmıştır. Bu değişiklik, soğuk plazmanın proteindeki hidrojen bağlarını bozduğunu ve daha esnek protein moleküllerine yol açabileceğini göstermektedir. Kombine YVASP ve UVSP uygulamaları, tek başına uygulamalara göre *A. flavus* sporlarına karşı daha yüksek fungisit etkinlik göstermiş, 8 dakikalık uygulama sonunda 10 log azalma sağlanmıştır. Depolama sırasında, bu kombinasyon, *A. flavus* büyümesi ve aflatoksin üretimini daha düşük seviyelerde tutmuştur. Ayrıca, soğuk plazma uygulamaları, ikincil ve üçüncül yapıları değiştirerek, parçacık boyutunu küçülterek ve zeta potansiyelini artırarak yer fıstığındaki proteinin moleküler yapılarını değiştirmiş, bu da proteinin çözünürlüğü ve emülsifikasyonunu iyileştirmiştir (Zhao vd., 2025). Hoppanová ise yaptığı bir çalışmada, ortam havasında eş düzlemli yüzey bariyeri deşarjı (EDYBD) kullanılarak üretilen soğuk atmosfer basıncı plazmasının (SABP), toksijenik mantar *Aspergillus ochraceus* (*A. ochraceus*)'un spor ve miselyum canlılığı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Plazma işlemi sonrasında hücre yüzeyindeki morfolojik ve yapısal değişiklikler belirlenerek, plazmaya maruz kalan konidia ile aşılanmış kültürlerde SABP işleminin okratoksin A (OTA) üretimi üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Burada *A. ochraceus Wilhelm CCM F-803* toksijenik fungal suşu kullanılmıştır. 14 gün boyunca 25 °C'de Malt Extract Agar üzerinde inkübe edilen konidia, %0,1 Tween 80 içeren steril fizyolojik tuzlu su çözeltisinde toplanmıştır. Spor sayısı, hemositometre ile sayılarak, konidia

konsantrasyonu steril fizyolojik tuzlu su ile ayarlanmıştır. Plazma işlemi uygulanan konidyum ve miselyumda yırtılma ve kuruma gibi morfolojik değişiklikler gözlenmiştir. Ayrıca, miselyumda dehidratasyon ve hif yüzeyindeki kimyasal bileşim değişiklikleri plazma işlemine bağlı olarak ortaya çıkmıştır. Yirmi altı saatlik inkübasyonda miselyum büyümesi, 30 saniyelik plazma işleminden sonra belirgin şekilde kısıtlanmıştır. Konidyum canlılığı, 180 saniyelik plazma işleminin ardından 4 log azalırken, neredeyse tamamen dekontamine olmuştur. Kısa süreli plazma işleminin ardından konidianın okratoksin A (OTA) üretimi başlangıçta artmış, ancak uzun süreli inkübasyon sonrasında plazma uygulanmamış örneklere kıyasla önemli ölçüde azalmıştır. Plazma işlemi sonrası, OH ve NH gruplarının gerilme titreşimlerine ait sinyal yoğunluğunda azalma ve yeni piklerin oluştuğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, plazma maruziyeti, lipitler ve polisakkaritlerin oksidasyonunu işaret eden spektral değişikliklere yol açmıştır. Bu değişiklikler, özellikle C–O ve C=O gruplarındaki gerilme titreşimlerinin artışıyla kendini göstermiştir (Hoppanová vd., 2020). Bir diğer çalışmada ise, *Aspergillus parasiticus* (*A. parasiticus*) türünün termal olmayan plazmaya maruz bırakılan konidiaları ile aşılanmış kültürlerde aflatoksin üretimi araştırılmıştır. Plazma, atmosferik basınçta eş düzlemli yüzey bariyeri deşarjı (EDYBD) yöntemiyle üretilmiştir. Suş, 25 °C'de malt özüt agarında saklanmış, konidyalar 14 gün sonra steril tuzlu su çözeltisinde toplanıp, filtrelenmiş ve santrifüj edilmiştir. Ardından konidya süspansiyonu plazmaya maruz bırakılmış, miselyum 37 °C'de 16-20 saat büyütülmüştür. Farklı pozlama süreleriyle yapılan plazma işlemi sonrası, *A. parasiticus* miselyum örneklerinden spektrumlar elde edilmiştir. Plazma işlemi uygulanmamış ve termal olmayan plazma maruziyeti uygulanmış miselyum örneklerinin Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (ATR-FTIR) spektrumları karşılaştırılmıştır. İşlenmemiş misel hiflerinde, 3450 ila 3200 cm^{-1} arasında OH ve N-H bağlarının tipik gerilme titreşimleri gözlemlenmiştir. Termal olmayan plazma işleminden sonra, susuz kalma nedeniyle bu bölgede pik yoğunluğunda azalma yaşanmış ve 3250 cm^{-1}'de su kaybına bağlı yeni bir pik oluşmuştur. Ayrıca, termal olmayan plazma ile işlem görmüş numunelerde lipitlerden kaynaklanan CH_3 ve CH_2 gruplarında gerilme titreşimleri artmış, C=O titreşimleri ve amid I-II bölgelerinde yoğunluk artışı gözlemlenmiştir. Termal olmayan plazma işlemi, hücre duvarındaki polisakkaritlerdeki değişiklikleri de ortaya çıkarmıştır (Hoppanová vd., 2022).

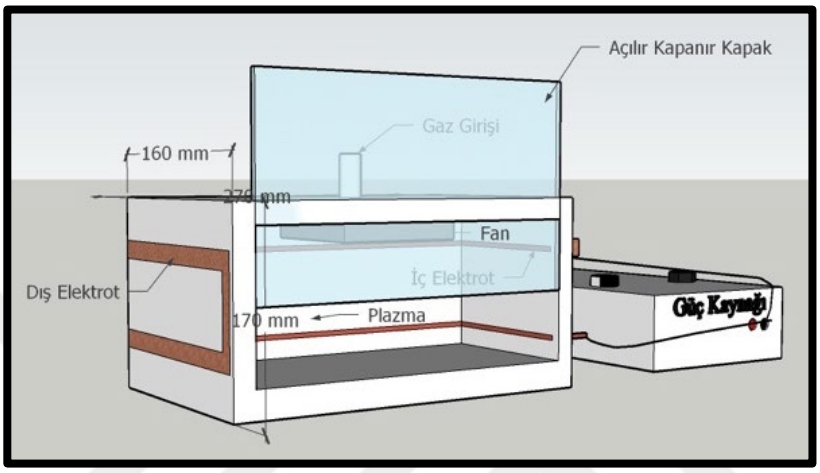
Başka bir çalışmada ise, farklı voltaj uygulamalarının aflatoksin üreten *A. flavus* suşları üzerindeki yıkıcı etkileri ve mekanizmalarını araştırmak için bir soğuk plazma cihazı kullanılmıştır. Farklı tedavi voltajları altında DBD plazması etkisiyle ilgili kinetik analizler yapılmış, *A. flavus* sporlarının morfolojisi ve yüzey kimyasal bağlarındaki değişiklikler incelenmiştir. DBD'nin mekanizması, hücre zarı sızıntısı, peroksidasyon ve ROT içeriği üzerinden araştırılmıştır. Deneyde, *A. flavus* 28°C'de 7 gün süreyle patates dekstroz agarına (PDA) aşılanmış, spor süspansiyonu steril su eklenerek elde edilmiş ve sayılmıştır. Deneyler, 50, 60 ve 70 V'luk voltajlarda ve 0-6 dakika arasındaki işlem sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Canlı spor sayımı ve aflatoksin tespiti sonuçları, 6 dakikalık 60 V uygulamasından sonra canlı sporların toplam sayısının 4,47 log CFU/mL azaldığını ve aflatoksin seviyesinin uygulamadan sonra önemli ölçüde daha düşük olduğunu göstermiştir. FTIR analizi, hücre duvarındaki kitinin asetilamino gruplarının dehidratasyonu veya modifikasyonu, lipitlerdeki titreşimler ve protein oksidasyonunu ortaya koymuştur. Ayrıca, hücre duvarındaki polisakkaritlerdeki değişiklikler ve proteinlerin oksidatif modifikasyonları gözlemlenmiştir. Bu bulgular, DBD plazmasının hücre duvarlarında su kaybına yol açtığını ve oksidatif değişikliklere neden olduğunu göstermiştir (Zhao vd., 2024). Diğer bir çalışmada ise, yaygın eş düzlemli yüzey bariyeri deşarjı (EDYBD) ile oluşturulan soğuk atmosferik basınç plazmasının (SABP) *A. flavus* hifleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. *A. flavus* CCM F-171 atoksijenik fungal suşu kullanılmıştır. Agar ortamına yerleştirilen selofan membranın (Ø 9 cm) üzerine eşit olarak yayılan spor sayısı, mikroskobik gözlemler için ya 2×10^7 spor ya da 20 spor olacak şekilde ayarlanmış ve 16-20 saat boyunca 37°C'de karanlık ortamda kültürlenmiştir. Ortam havasında SABP üreten EDYBD, misel örneklerinin işlenmesinde kullanılmıştır. Plazma işleminden önce ve sonra, *A. flavus* yüzeyindeki belirli kimyasal gruplardaki değişikliklerin tespiti için zayıflatılmış toplam yansıma Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (ATR-FTIR) kullanılmıştır. ATR-FTIR analizi, hif yüzeyindeki moleküler yapılardaki kimyasal değişiklikleri gösteren C=O ve C-O gerilme titreşimleri için sinyal yoğunluğunda bir artış olduğunu ortaya koymuştur (Šimončicová vd., 2018).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

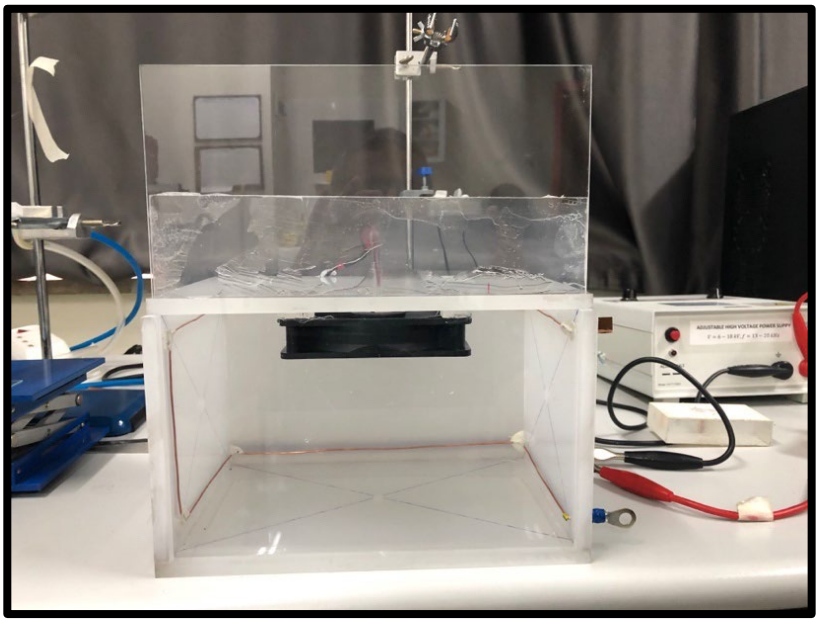
3.1. YDBD Reaktörü

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Soğuk Plazma Laboratuvarında tasarlanan ve üretilen YDBD plazma reaktörünün şematik gösterimi Şekil 3.1a'da, fotoğrafı Şekil 3.1b'de ve üretilen plazmanın fotoğrafı Şekil 3.1c'de verilmiştir. Bir dikdörtgen prizma şeklindeki bir plazma ünitesi, 270 mm uzunluğunda, 160 mm genişliğinde ve 170 mm yüksekliğinde olacak şekilde 1 cm kalınlığında plexiglas kullanılarak monte edilmiştir. Plazma ünitesinin ön kısmında, kanalları bulunan (kanal genişliği 3,40 mm, kanal derinliği 4,5 mm) bir plexiglas kapağı (genişlik: 260 mm, yükseklik: 300 mm, kalınlık: 3 mm) bulunmaktadır. Kap açılıp kapatılarak, soğuk plazma ile uygulanacak biyolojik örnek ünite içine yerleştirilebilmektedir. Ünite içinde "iç elektrotlar" olarak adlandırılan, kalınlığı 1,5 mm olan iki sıra bakır kablo bulunmaktadır. Ünitenin dışına, "dış elektrotlar" olarak adlandırılan bakır tellerin tam karşısına denk gelecek şekilde yerleştirilmiş olan, 1 cm genişliğinde ve 0,5 mm kalınlığındaki bakır levhalar monte edilmiştir. Plazma ünitesi bir yalıtkandan üretildiği için, iç ve dış elektrotlar arasında yalıtkan bir malzeme olarak görev yapmaktadır. İç elektrot, 6-18 kV arasında ve frekans değeri 13-20 kHz alternatif gerilim güç kaynağının yüksek gerilimine bağlanır. Dış elektrot toprağa bağlanır. Elektrotlar arasına yüksek gerilim uygulandığında, ünite içinde atmosferik hava ile çalışan bir YDBD plazma ateşlenir. Bu plazma, ünite içindeki bakır tellerin hemen altında ateşlenir ve mavi-mor ışık üreten çok sayıda mikrodeşarj plazma üretir. Ünitenin iç kısmının üstünde 12 mm çapında bir elektrikli fan bulunur. Bu fan, oluşturulan plazma ürünlerinin (özellikle ozon ve NO) ünite içinde dolaşmasını sağlar. Böylece, üretilen tüm plazma ürünleri ünite içinde plazma ile tedavi edilecek biyolojik örneklerin tüm bölgelerine taşınır. Fanın hemen üstünde 7 mm çapında bir delik bulunur. Bu deliğe 38 mm yüksekliğinde 7 mm çapında cam bir tüp monte edilmiştir. Aynı zamanda fanın elektrik bağlantısı da buradan çıkarılır. Fan çalışırken, atmosferik hava bu cam boru aracılığıyla üniteye çekilir (fan içeri doğru çalışır). Diğer gazlar, oksijen, helyum ve argon gibi gazlar da bu cam boru kullanılarak üniteye girebilir. Sistem çok yüksek miktarda ozon ürettiği için deneyler sırasında çeker

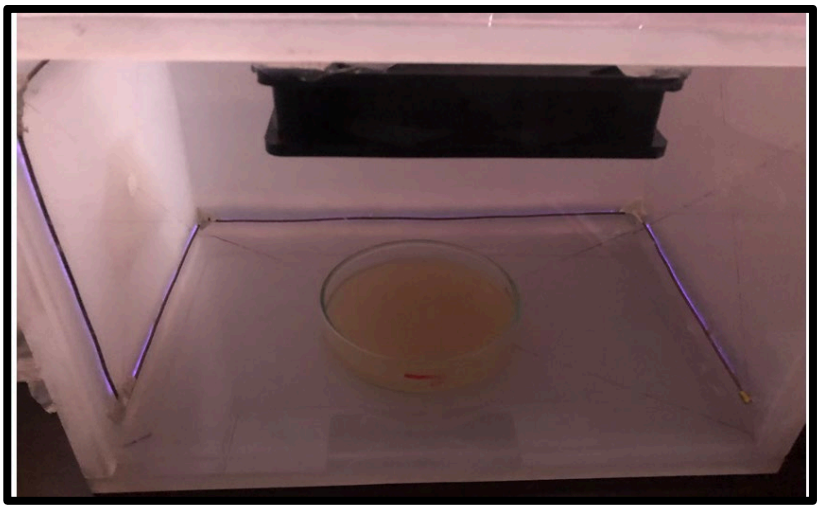
ocak içinde çalıştırılmıştır (Akan ve Durmuş, 2023). Standart Gram-negatif *P. aeruginosa* ve *E. coli* ve Gram-pozitif *S. aureus* ve *E. faecalis* bakterileri Şekil 3.1c'de görüldüğü gibi petri kabı içinde agar üzerine kültürlendikten sonra 60, 180, 300 ve 600 saniye süre ile YDBD plazma reaktörünün ortasına konulmuştur. Deney sırasında petri kabına kırmızı işaret konularak hangi taraftaki plazmadan daha fazla etkilendiği görülmek istenmiştir.



(a)



(b)

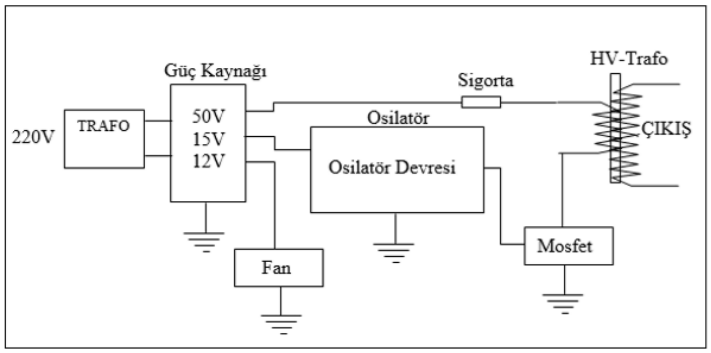


(c)

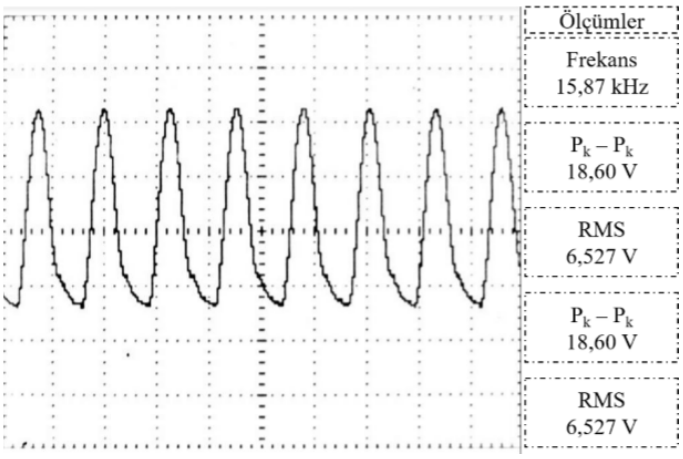
Şekil 3.1. YDBD Reaktörünün **a.)** şematik gösterimi, **b.)** fotoğrafı, **c.)** YDBD plazması (Akan ve Durmuş, 2023).

3.2. Güç Kaynağı

Alternatif akım güç kaynağı olarak voltaj değeri 6-18 kV arasında ve frekans değeri 13-20 kHz arasında ayarlanabilen alternatif akım güç kaynağı (ELES HV-711GK4) kullanılmıştır. Şekil 3.2'de AC güç kaynağının tasarımı, Şekil 3.3'te osiloskop çıktısı ve Çizelge 3.1'de özellikleri verilmiştir. Güç kaynağını korumak için arkasında bir adet soğutma fanı ve güç kaynağının yüksek akım çekmesini önlemek için 1 amper sigorta bulunmaktadır. Şekil 3.4'te YDBD reaktöründe plazma üretmek için kullanılan güç kaynağının fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 3.2. AC güç kaynağının tasarımı.



Şekil 3.3. AC güç kaynağının osiloskop çıktısı.

Çizelge 3.1 AC güç kaynağının özellikleri.

Özellik	**Değer**
İşletme Gerilimi	1 faz 1 nötr, 220 V-240 V
Trafo Gücü	80 W
İşletme Frekansı	50 Hz
Gecikme Zamanı	10 ms
Ortam Sıcaklığı	–5 ℃-50 ℃
Çıkış Frekansı	13-20 kHz
Çıkış Gerilimi	6-18 kV (t-t)
Koruma Sınıfı	IP 20
Boyutlar	280x220x100 m^3



Şekil 3.4. Güç kaynağı fotoğrafı.

3.3 Yüksek Voltaj Probu

Güç kaynağının Osiloskop çıktılarını almak için PINTEK HVP-40 model 1 V/1 kV'luk yüksek voltaj probu kullanılmıştır. Şekil 3.5'te kullanılan yüksek voltaj probunun fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 3.5. Yüksek voltaj probu fotoğrafı.

3.4. Osiloskop

Yüksek voltaj probu ile plazma voltajı ve şönt direnç üzerindeki voltaj dolayısıyla plazma akımını ölçebilmek için INSTEK GDS-1052-U osiloskop kullanılmıştır. Osiloskop

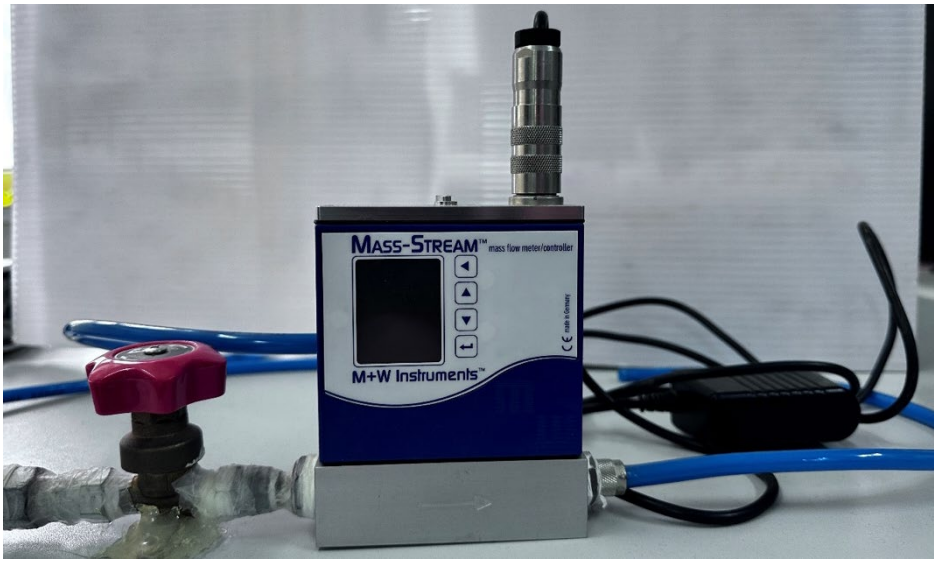
özellikleri; tarama frekansı 50MHz, giriş voltajı 300V, yetişme süresi ≤ 7ns, giriş empedansı 1MΩ/16pF olarak belirtilmiştir. Şekil 3.6'da fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 3.6. Osiloskop fotoğrafı.

3.5. Akış Ölçer (debimetre)

YDBD plazma sistemine üst kısmında bulunan fan yardımıyla çekilen atmosferik hava Mass-Stream M+W Instruments 0-6L/dak gaz akış ölçer kullanılarak ölçülmüştür ve fotoğrafı Şekil 3.7'de verilmiştir.



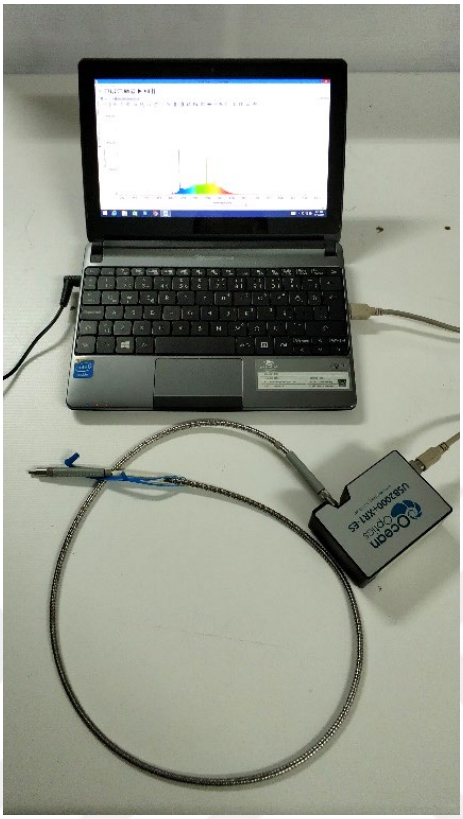
Şekil 3.7. Akış ölçer fotoğrafı.

3.6. Spektroskopi Cihazı

Üretilen YDBD plazmanın spektroskopik incelenmesinde Şekil 3.8'te fotoğrafı verilen optik emisyon spektroskopisi kullanılmıştır. Bunun için Ocean Optics marka USB 2000+ model spektrometre, Ocean Optics marka fiber kablo, bilgisayar ve OceanView bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Kullanılan spektrometre 200-1100 nm ölçüm aralığına sahiptir. Spektrometre bilgisayara USB girişi üzerinden bağlanılmaktadır. Fiber kablo ölçüm alınacak bölgeye güvenli bir mesafede sabit tutularak ölçüm alınmıştır. Bilgisayar yazılımı üzerinden spektrometrenin 1 ms ile 60 s arasında istenilen süre kadar fotonları toplamasına izin verilebilmektedir. Bu tez çalışmasında alınan ölçümlerde bu süre 1 s olarak ayarlanmıştır. Çizelge 3.2'te optik emisyon spektrometresinin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.2. Optik emisyon spektrometresinin özellikleri.

Spektrometre Türü	Atomik emisyon spektrometresi
Marka – Model	Ocean Optics–USB 2000+
Detektör Tipi ve Ölçüm Aralığı	Lineer silikon CCD, 200-1100 nm
Giriş Sliti	25 μm
Piksel Sayısı ve Boyutu	2048-14 μm x 200 μm
Optik Çözünürlük	2,1 nm
Hassaslık	400 nm'de 75 foton/sayım, 600 nm'de 41 foton/sayım
Odak Uzaklığı	42 mm giriş, 65 mm çıkış
Integration Time (Birleştirme Süresi)	1 ms-60 s



Şekil 3.8. Optik emisyon spektrometresi.

3.7. Nem Ölçer

YDBD reaktörü içindeki nem oranı Şekil 3.9'da verilen nem ölçer ile yapılmıştır.



Şekil 3.9. Nem ölçer fotoğrafı.

3.8. Sıcaklık Ölçer

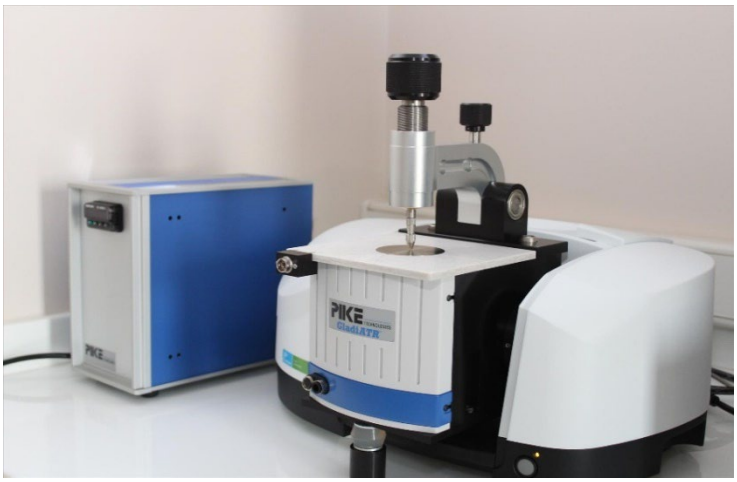
YDBD reaktörü içindeki sıcaklık ölçümleri Şekil 3.10'da verilen Benetech marka kızılötesi termometre ile yapılmıştır.



Şekil 3.10. Sıcaklık ölçer fotoğrafı.

3.9. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi (FTIR)

Aspergillus sp. küfünün FTIR incelemesi için kullanılan Şekil 3.11'de fotoğrafı verilen Perkin Elmer Spectrum Two FTIR cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.11. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi (FTIR) fotoğrafı.

3.10. Bakteriyel İşlemler

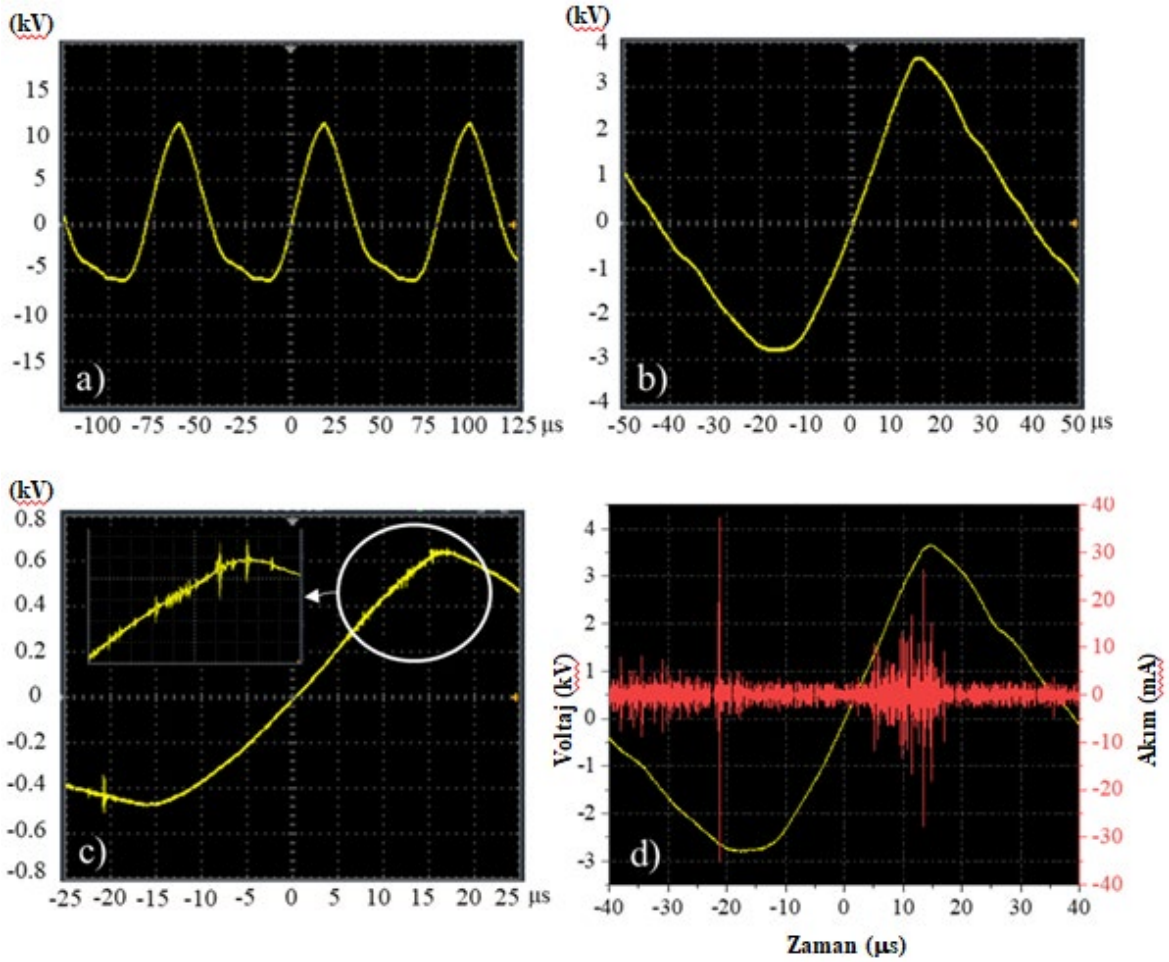
Standart Gram-negatif *P. aeruginosa* ve *E. coli* ve Gram-pozitif *S. aureus* ve *E. faecalis* bakteri suşları, -80°C'de bir derin dondurucuda (Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Biyoteknoloji Laboratuvarı, Eskişehir/TÜRKİYE) saklanmıştır. Bakteri suşu Tryptic Soy Broth (TSB) besiyerine inoküle edilmiş ve aerobik olarak 37°C'de 24 saat boyunca inkübe edilmiştir. Suş daha sonra aynı koşullar altında Tryptic Soy Agar (TSA) üzerine subkültür yapılmıştır. Büyüme inhibisyonunun bölgesini belirlemek için gece boyunca süren bakteri kültürü, steril %0,9'luk tuzlu suyla seyreltilmiş (x1000) ve seyreltilmiş bakteri süspansiyonunun 100 µL'si daha sonra TSA plağının yüzeyine eşit olarak yayılmıştır. Daha sonra belirtilen sürelerde YDBD reaktörü ile hemen işleme tabi tutulmuştur. Plazmaya maruz kaldıktan sonra, plakalar 37°C'de statik bir inkübatörde 24 saat boyunca inkübe edilmiş ve bakteriyel büyüme inhibisyon bölgelerini gösteren agar plakalarının fotoğrafları bir dijital kamera kullanılarak çekilmiştir. Tüm bakteri deneyleri üç kez tekrarlanmış ve sonuçları aynı deneysel koşullarda yapılmıştır.

Aspergillus sp. küfü +4 °C'de Malt Agar besiyerinde stoklanmış, 100 mL Malt Broth besiyerine ekim yapılmıştır. 27°C'de 1 hafta boyunca çalkalamalı inkübatörde inkübe edilmiştir. Oluşan küf sporları steril öze yardımıyla toplanarak %1,5 NaCl içeren Serum Fizyolojik çözeltisine hazırlanarak farklı sürelerde aynı deneysel koşullarda yapılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Elektriksel Analiz

Şekil 4.1a YDBD reaktöründe plazma üretmek için kullanılan AC yüksek gerilim güç kaynağının çıkış sinyalinin osiloskop görüntüsünü göstermektedir. Şekil 4.1b'de YDBD reaktörünün üzerindeki AC gerilim tipik sinüzoidal dalga formunu gösterirken, karşılık gelen deşarj akımı Şekil 4.1c'de verilmiştir. Dielektriklerde ve plazma radyasyon/moleküler reaksiyonlarda meydana gelen kayıplar, plazma gerilimini 6,48 kV'ye düşürdü. Şekil 4.1c ayrıca akımın (aslında şönt direnci üzerindeki gerilim değeridir ve deşarj akımı 1 kΩ direnci bölmek suretiyle hesaplanır) daha hassas bir görünümünü sunmayı amaçlayarak, pozitif yarı gerilim döngüsüne odaklanan büyütülmüş bir görünüm verilmiştir. Akım dalga formları temel olarak Şekil 4.1c'de görüldüğü gibi deplasman ve deşarj akımlarından oluşur. Deplasman akımı, uygulanan gerilimdeki değişikliklere yanıt olarak oluşturulan akımı temsil eden sinüzoidal bir dalga formu sergilemektedir. Deşarj akımı, uygulanan gerilimin pozitif ve negatif yarı döngülerinde üzerine binmiş darbeler şeklinde görünmektedir. Şekil 4.1d'de, deplasman akımı çıkarılarak elde edilen deşarj gerilimi ve akım dalga formları ayrıca bir bilgisayar programı (Origin Pro) ile düzenlenerek verilmiştir. Deşarj akımı, her yarı gerilim döngüsü sırasında mikro deşarjların darbelerini sergilemekte ve bu, YDBD'nin karakteristik filamentli deşarjını göstermektedir. Mikro-deşarjlar sırasında filaman üzerinden geçen akım 37,4 mA'ya kadar çıkmaktadır. Özellikle pozitif yarı gerilim döngüsü sırasında, negatif yarı gerilim döngüsüne göre akım sıçramalarının daha yüksek olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, negatif yarı gerilim döngüsünde, pozitif yarı gerilim döngüsüne göre daha yüksek bir akım sıçraması mevcuttur. Bu yüksek mikro-deşarj akımının nedeninin dielektriğin nispeten kalın olması ve orada biriken yüklerin ani bir şekilde deşarj edilmesi olduğunu düşünüyoruz (Akan ve Durmuş, 2023).



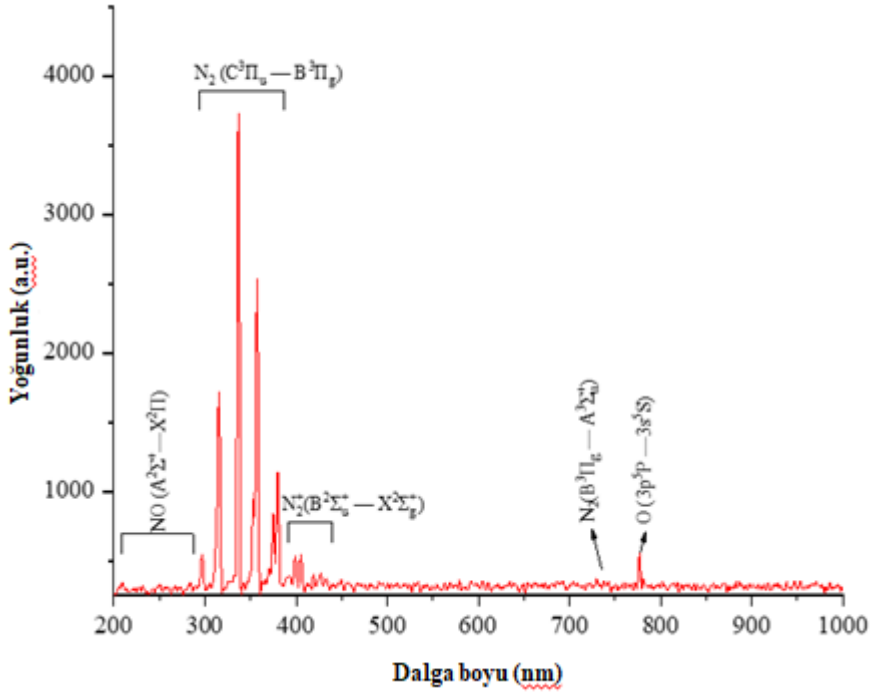
Şekil 4.1 a.) Plazma üretmek için kullanılan güç kaynağının çıkış gerilimi, **b.)** YDBD reaktörüne uygulanan gerilim, **c.)** bir darbe deşarj süresi boyunca şönt direnci üzerindeki gerilim ve **d.)** deşarj akımının ve uygulanan gerilimin zamanla değişim grafiği (Akan ve Durmuş, 2023).

YDBD plazma içinde harcanan elektriksel güç, reaktörün verimliliğini değerlendirmek için kullanılan, her bir zaman noktasında deşarj gerilimi ve akımının çarpılması ve ardından yüksek gerilim dalga formunun bir periyodu boyunca bu değerin ortalamasının alınmasıyla basitçe hesaplanabilir. Bu yaklaşım en basit olanıdır ancak önemli belirsizlikler içermektedir. Periyot boyunca ortalama hesaplandığında, deplasman akımıyla ilişkilendirilen güç sıfır olmalıdır, ancak bu katkının iptali ölçümün hassasiyetini etkileyebilir. Pozitif ve negatif yarı gerilim darbeleri için kaydedilen en yüksek saptanabilir deşarj akımı maksimumları sırasıyla 26,4 mA ve 37,4 mA olarak bulundu. Bu akımlar için en yüksek anlık güçler sırasıyla 98,7 W ve 93,9 W olarak hesaplandı. On tane pozitif yarı gerilim darbelerinden dokuzu ve negatif yarı gerilim darbelerinden biri olmak üzere

tanımlanabilir en yüksek deşarj akımı maksimumumlarından elde edilen ortalama güç 31,4 W olarak bulundu. YDBD reaktörünün fanı tarafından desteklenen 0,3 L/s gaz akış hızı ile bu ortalama güç için enerji yoğunluğu 104,7 J/L olarak hesaplandı (Akan ve Durmuş, 2023).

4.2. Optiksel Analiz

YDBD sisteminden elde edilen Optik Emisyon Spektroskopisi (OES) sonuçları reaktör içindeki reaksiyonlar ve parçacık türleri hakkında bilgi sağlar. YDBD reaktörü içinde, OES ölçümleri enerji elektrodundan 2 mm mesafeden alınmıştır. YDBD reaktöründeki atmosferik hava plazmasının optik emisyon spektrumu Şekil 4.2'de verilmiştir. Bu spektrum, Ocean Optics USB2000+XR1-ES cihazı ile elde edilmiştir. Şekil 4.2'de ise hava içinde üretilen YDBD tarafından oluşturulan emisyon spektrumlarını gösterir ve bu spektrumlar N_2'nin ikinci pozitif sistem (SPS) ($C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$) ve N_2+ ilk negatif sistem (FNS) ($B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+$) tarafından gösterilen güçlü bantları UV spektral aralığında içerir. VIS-NIR aralığında, N_2'nin ilk pozitif sistemine (FPS) ($B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+$) ait karakteristik bant dizileri de gözlenmiştir. Beklendiği gibi, YDBD hava plazması atmosferik ortamda üretildiğinden, birçok nitrojen reaksiyonunun meydana geldiği ve dolayısıyla nitrojen iyonları ve uyarılmış partiküllerin plazmada bulunduğu görülür. Atomik oksijen emisyon çizgisi 777 nm'de görülürken, NO molekülünün emisyon çizgisi 200-300 nm dalga boyunda görülür ki bunlar önemli antimikrobiyal aktivitelere sahiptir (Akan ve Durmuş, 2023).



Şekil 4.2. YDBD plazması optik emisyon spektrumu (Akan ve Durmuş, 2023).

4.3. Nem, Sıcaklık ve Ozon Ölçümü

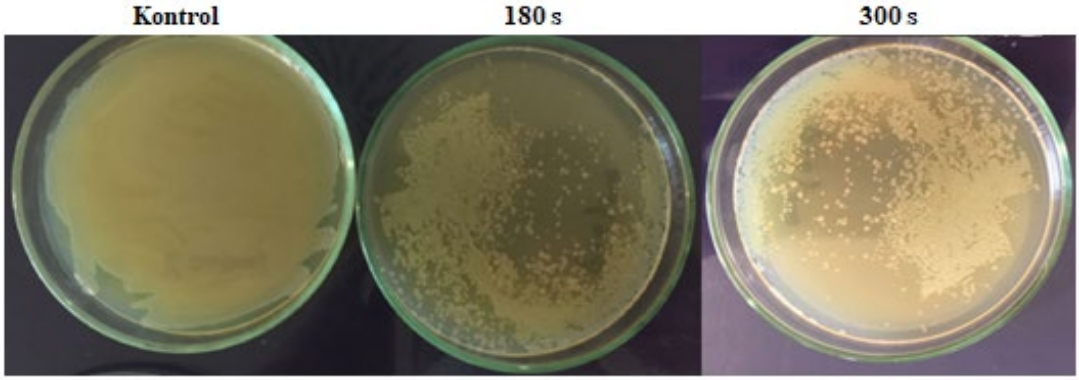
YDBD reaktöründe ölçülen nem, 600 saniye içinde %22'den %40'a çıktı, ancak sıcaklık yaklaşık 27°C civarında kaldı. Ortam sıcaklığı 26,5°C idi ve ortam nem oranı %22'ydi.

YDBD plazmalar aynı zamanda önemli miktarda ozon da üretirler (Pekárek, 2012). Başlangıç aşamasında, deşarj sırasında oluşan serbest yükler oksijen molekülleriyle etkileşirler ve onları ayrı ayrı oksijen atomlarına ayırırlar (e + O2 → e + O + O). Daha sonra, bu oksijen atomlarından biri, oksijen molekülleri ve başka bir hava molekülü (genellikle oksijen veya azot) ile birlikte üçlü bir reaksiyon gerçekleşir ve ozon molekülleri (O + O2 + M → O3 + M) oluşur (Akan ve Durmuş, 2023). Ozon ve çeşitli oksijen ve azot türlerinin oluşumundan sorumlu plazma kimyasının daha kapsamlı bir açıklama (Yao vd., 2015) da verilmiştir. YDBD'ler ateşlendiğinde ozon konsantrasyonları ölçülmedi. Ancak, YDBD deşarjlarından 60 saniye sonra bile bilinen ozonun rahatsız edici kokusu algılandı. YDBD'lerin plazma enerji yoğunluğu 800-1000 (J/L) arasında olduğunda, 250 ppm'den

fazla ozon üretirler (Pemen vd., 2009). Abdülaziz ve diğerleri tarafından yürütülen çalışmada, YDBD reaktöründe 10 kHz frekansta ve 6 kV uygulanan gerilimle 85 J/L enerji yoğunluğunda 340 ppm'ye kadar maksimum ozon konsantrasyonu elde edildi (Abdelaziz vd., 2016). Çalışmalarında, reaktörlerinde ozon üretimi ile çalışma frekansı arasındaki ilişkiyi açıkladılar. Özellikle farklı frekansta enerji yoğunluğuna göre ozon konsantrasyonunu gösterdiler. Bizim YDBD plazma reaktörümüz, önemli ölçüde daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olduğu için çok daha yüksek ozon konsantrasyonları üretiyor olduğu görüldü. Aynı çalışmada, FTIR spektrumlarında tanımlanan başlıca yan ürünlerin N_2O, N_2O_5 ve NO_2 olduğu açıklandı. Ayrıca, FTIR spektrumlarında gözlemlenen tepe noktaları, N_2O_5'in reaktörde üretilen baskın nitrojen oksit türü olduğunu ve ozonun ardından en baskın ikinci reaktif tür olduğunu göstermektedir.

4.4. Bakteriyel İnaktivasyon

YDBD plazmaya *P. aeruginosa* planktonik bakterileri, petri kaplarında agar içinde kültürlendikten sonra Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Soğuk Plazma Laboratuvarı'nda geliştirilen YDBD reaktörü içine yerleştirilerek 180 ve 300 saniye boyunca YDBD plazmaya maruz bırakılarak inaktive edildi. YDBD plazmasına maruz bırakılmayan içinde *P. aeruginosa* planktonik bakteriler bulunan kontrol petri kabı ve plazmaya maruz bırakılan petri kaplarının fotoğrafları Şekil 4.3'de verilmiştir. Kontrol petri kabında agar üzerinde son derece yoğun bakteri üremesi olurken YDBD plazmasına maruz kalan agar üzerinde bakteri üremesi çok daha az olmuştur. Soğuk plazmaya maruz kalan *P. aeruginosa* planktonik bakterilerinin inaktivasyona uğradıkları görülmektedir ancak 300 saniye uygulamanın tümüyle inaktivasyon için yeterli olmadığı da görülmektedir.



Şekil 4.3. Farklı sürelerde YDBD-hava plazma uygulanan inkübasyondan sonra *P. aeruginosa* planktonik bakteri içeren agar plakalarının fotoğrafları.

E. coli, insanlar ve hayvanlarda doğal olarak bulunan bir bakteri türüdür. Genellikle insan bağırsağı, hayvan bağırsağı ve toprak gibi yerlerde bulunur. Bazı *E. coli* çeşitliliği insan sağlığını olumsuz etkileyebilir. Özellikle "patojenik" *E. coli* olarak adlandırılan bu suşlar, hastalıklara neden olabilirler. *Enterotoxigenic E. coli* (ETEC), gıda kaynaklı ishale neden olabilen bir suştur. Genellikle kirli veya kontamine su ve gıdalar yoluyla bulaşır. Seyahat ishali olarak da bilinir. *Enterohemorajik E. coli* (EHEC), *E. coli* O157:H7 alt türü dahil olmak üzere bazı alt tipleri içerir. Bu türler, gıda kaynaklı salgınlara yol açabilir ve ciddi ishale ve böbrek yetmezliğine neden olabilir. *Enteroinvaziv E. coli* (EIEC), insanların bağırsak hücrelerine işgal edebilen ve iltihaplı ishal yaratabilen bir suştur. *Enteroaggregatif E. coli* (EAEC), kronik ishal ve çocuklarda gelişim sorunlarına neden olabilen bir suştur. Bu patojenik *E. coli* suşları, kirli su, kontamine gıdalar, temas veya enfekte kişilerle temas yoluyla bulaşabilirler. İshal, karın ağrısı, kusma, ateş gibi semptomlara yol açabilirler. Ayrıca bazı suşlar böbrek sorunlarına, sinir sistemi sorunlarına ve diğer ciddi komplikasyonlara neden olabilirler.

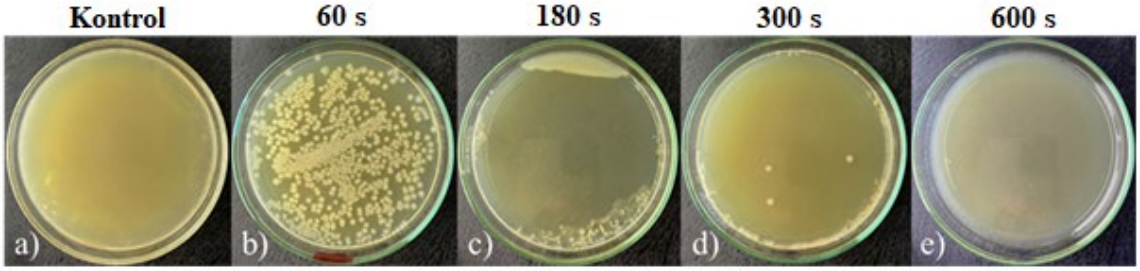
S. aureus, çok yaygın ve çeşitli yerlerde bulunan bir bakteri türüdür. Bu bakteri, normalde cilt, burun, boğaz, mide, bağırsak ve genital bölge gibi insan vücudu bölgelerinde bulunur. Ayrıca, *S. aureus* çevremizdeki nesnelerde ve yüzeylerde de bulunabilir. Cilt yaraları veya kesikler gibi durumlarda enfeksiyonlara neden olabilir. Bu, basit deri enfeksiyonlarından, apselerden (iltihap toplaması), selülit (deri altı dokuların enfeksiyonu) gibi ciddi enfeksiyonlara kadar değişebilir. *S. aureus*, birçok insanın burun ve boğaz mukozasında bulunur. Genellikle bu bölgelerde enfeksiyona neden olmazlar, ancak

bazen sinüzit, bademcik iltihabı veya boğaz enfeksiyonları gibi problemlere yol açabilirler. *S. aureus*'un bazı suşları hastanelerde yaygın olarak bulunur. Bu tür *S. aureus*, MRSA (*Methicillin-resistant Staphylococcus aureus*) olarak adlandırılır ve antibiyotiklere dirençlidir (Maisch vd., 2012). Hastane enfeksiyonlarının kaynaklarından biri olabilir ve bu enfeksiyonlar ciddi olabilir. *S. aureus* bazen gıdalarda bulunur ve gıda kaynaklı zehirlenmelere neden olabilir. Toksinlerini üretebilen bazı suşları, gıdaların saklama veya hazırlama koşullarına bağlı olarak zehirlenmelere yol açabilir.

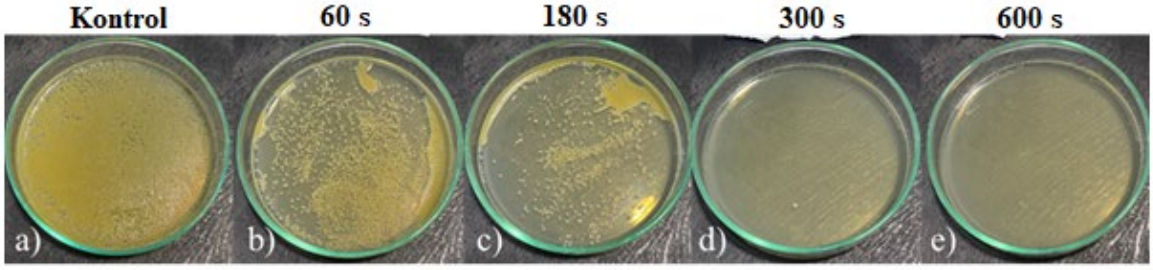
E. faecalis, genellikle insan ve hayvanların sindirim sistemlerinde bulunan Gram-pozitif bir bakteri türüdür. *E. faecalis*, özellikle bağırsaklarda ve sindirim sisteminin alt bölgelerinde bulunur. Normalde bağırsak florasının bir parçasıdır ve birçok insanın sindirim sisteminde bulunur. Genellikle bu bölgede zararsızdır, ancak bazen idrar yolu enfeksiyonlarına, üriner sistem enfeksiyonlarına ve nadiren kan dolaşımı enfeksiyonlarına neden olabilir. *E. faecalis*, toprakta ve su kaynaklarında bulunabilir. Özellikle kanalizasyon suları ve kirli su kaynaklarında daha yoğun olarak bulunur. Bu nedenle, bu tür sulardan kaynaklanan enfeksiyon riskleri vardır. *E. faecalis*, bazı gıdalarda da bulunabilir, özellikle süt ve süt ürünleri gibi. Bu, gıda kaynaklı enfeksiyonlara yol açabilir. *E. faecalis*, diş hekimliği uygulamalarında özellikle endodontik (kök kanal) tedavi ile ilişkilendirilen bir mikroorganizmadır (Akan ve Durmuş, 2023). *E. faecalis*, özellikle tedavi edilmemiş veya tam olarak temizlenmemiş kök kanal sistemlerinde bulunabilir. Diş hekimleri, kök kanal tedavisi sırasında kök kanal sistemini temizler ve doldurur, ancak bu işlem tam olarak yapılmazsa veya kök kanal tedavisi sırasında yeniden enfekte olursa *E. faecalis* gibi bakteriler enfeksiyonun tekrarlamasına neden olabilir. *E. faecalis*, diş implantları veya protezler etrafında enfeksiyonlara yol açabilir. Diş implantları, protezler veya diğer diş uygulamaları sırasında enfeksiyon riskini artırabilir ve diş etlerinde enfeksiyonlara yol açabilir. Bu dişeti enfeksiyonları, diş eti iltihaplarına (gingivitis) veya daha ciddi periodontal hastalıklara yol açabilir. *E. faecalis* kök kanal enfeksiyonlarından kaynaklanan kök ucu kistlerine yol açabilir. Bu, kemik dokusu üzerinde olumsuz etkilere neden olabilir ve tedavi gerektirebilir.

Gram-negatif *E. coli* ve Gram-pozitif *S. aureus* ve *E. faecalis* planktonik bakteri örnekleri, ESOGÜ Soğuk Plazma Laboratuvarı'nda geliştirilen YDBD reaktörü tarafından 60, 180, 300 ve 600 saniye süreyle soğuk plazmaya maruz tutuldu. Kontrol plakaları

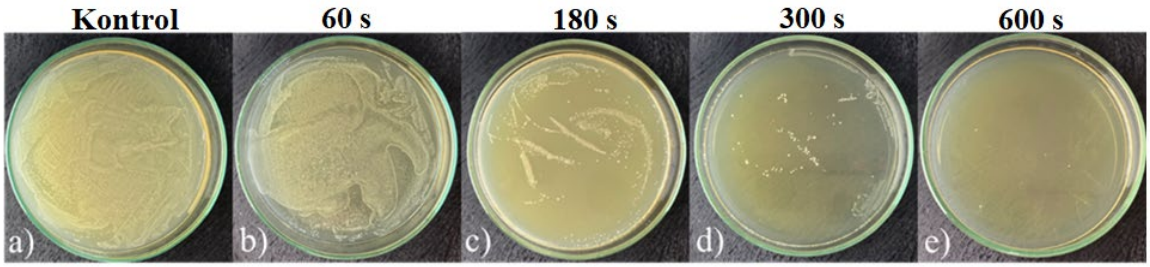
(plazma uygulanmayan) son derece yüksek üremeye sahipken, ancak Şekil 4.4'te *E. coli*, Şekil 4.5'te *S. aureus* ve Şekil 4.6'da *E. faecalis* bakteri suşlarını işleyen YDBD tarafından oluşturulan soğuk plazma uygulanan plakalarında büyüme inhibisyonunun net görüldüğü bir öldürme bölgesinin varlığı görülmektedir. 300 saniyelik plazma işleminden sonra, *E. coli*, *S. aureus* ve *E. faecalis*'in planktonik bakteri kolonileri sırasıyla 3, 2 ve 140'a düştü. 300 saniyelik plazma işleminden sonra koloni sayısı belirgin bir şekilde azaldı, ancak koloniler hala petri kaplarının iç kenarlarında oluştuğu görüldü. Bu sorunun belirli bir bölgeye bakteri yapışmasından kaynaklandığını düşünüyoruz (Akan ve Durmuş, 2023).



Şekil 4.4. Farklı sürelerde YDBD-hava plazma uygulanan inkübasyondan sonra *E. coli* planktonik bakteri içeren agar plakalarının fotoğrafları (Akan ve Durmuş, 2023).



Şekil 4.5. Farklı sürelerde YDBD-hava plazma uygulanan inkübasyondan sonra *S. aureus* planktonik bakteri içeren agar plakalarının fotoğrafları (Akan ve Durmuş, 2023).



Şekil 4.6. Farklı sürelerde YDBD-hava plazma uygulanan inkübasyondan sonra *E. faecalis* planktonik bakteri içeren agar plakalarının fotoğrafları (Akan ve Durmuş, 2023).

Soğuk plazma tarafından üretilen reaktif türlerin biyolojik hücreler üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalar, hücre ölümü, hücre ayrılması ve hücresel morfolojide değişikliklerin elde edilebileceğini gösterdi (Woedtke vd., 2013; Schlegel vd., 2013). Son yıllarda hücreler üzerinde plazma etkilerinin mekanizmalarını açıklamak için yapılan birçok araştırmaya rağmen (Bourke vd., 2017), soğuk plazma ile mikroorganizmaların inaktivasyon mekanizmaları hala tartışılmaktadır. Soğuk plazmanın biyolojik hücreler üzerindeki etki mekanizmalarına dair öneriler, plazmada üretilen türlerin biyolojik hücre ile doğrudan etkileşimine dayandırılır (Kong vd., 2009). Ancak, son yıllarda önemli bir ayrıntı gündeme gelmiştir. Bilindiği gibi, özellikle laboratuvar koşullarında kültürlenen biyolojik hücreler sıvı içinde üretilir. Bu nedenle, soğuk plazma tarafından üretilen birincil plazma türleri (elektronlar ve iyonlar, metastabil dahil uyarılmış türler, diğer atomik ve moleküler reaktif türler, radyasyon (etkili bir şekilde UV) ve elektrik alan), biyolojik hücrenin yapısına ulaşmadan önce bu sıvıyla temas halindedir. Atmosferik koşullarda üretilen birincil soğuk plazma türleri, bu sıvı ile karşılaşmadan önce nem içeren atmosferik hava ile etkileşir (Akan ve Durmuş, 2023).

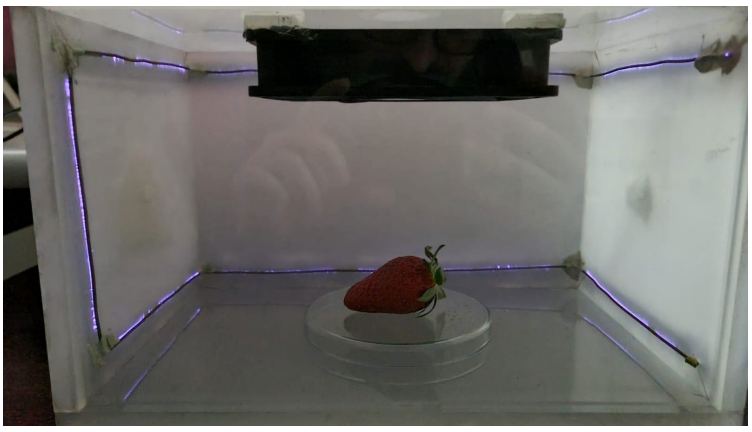
Soğuk plazma tarafından üretilen birincil plazma türleri, nem içeren atmosferik hava ile etkileşime girerek O, OH, O_3, O_2^-, NO ve NO_2 gibi yeni ikincil türlerin üretilmesine neden olur. Bu ikincil türler ve birincil türler, biyolojik hücreleri çevreleyen sıvı ile etkileşime girdiklerinde, buharlaşma, iyonlaşma, sputterleme ve difüzyon gibi süreçler aracılığıyla sıvı yüzeyinde yeni bir sıvı-gaz arayüzünün oluşmasına neden olurlar. Daha sonra, birincil ve ikincil türler bu arayüzde ortaya çıkan türlerle etkileşmeye başlarlar ve H_2O^+, OH, O, H, NO, O_2, O_2^-, HNO_3, H_2O_2, HNO_2, O_3 ve elektronlar gibi yeni türlerin oluşumuna neden olabilirler (Samukawa vd., 2012). Arayüzde ortaya çıkan türler, biyolojik

hücreyi çevreleyen sıvıya nüfuz etmeye başlar ve sıvı içinde yeni kimyasal reaksiyonlarla yeni türler (O_2^-, NO, NO_2, HNO_3, H_2O_2, HNO_2, ONOOH, $ONOO^-$, O_2NOOH) oluşturarak sıvının özelliklerini değiştirir (Liu vd., 2021). Biyolojik hücreler, bu aşamada ortaya çıkan sıvıdaki türler veya yeni yapısal biçimi tarafından etkilenir ve ölüm, ayrılma ve hücresel morfolojide değişiklik gibi süreçler gerçekleşir (Woedtke vd., 2022).

4.5. Gıda Üzerine Uygulama

YDBD cihazı ile üretilen mikroplazmalar çilek, çeri domates, peynir ve ekşi mayalı ekmek üzerinde uygulanmıştır. Gıdalar işlem öncesinde herhangi bir kimyasal işlem, yıkama, ısı ve benzeri işlemler uygulanmadan 120, 300 ve 600 saniye boyunca soğuk plazmaya maruz bırakılmıştır. İşlem sırasında çekilen Şekil 4.7'de YDBD reaktörü içindeki çilek fotoğrafı, Şekil 4.9'da YDBD reaktörü içindeki çeri domates fotoğrafı, Şekil 4.11'de YDBD reaktörü içindeki peynir fotoğrafı, Şekil 4.13'te YDBD rektörü içindeki ekşi mayalı ekmek fotoğrafı görülmektedir.

Şekil 4.8'de plazmaya maruz kalmış çileklerin plazmaya maruz kalmamış çileklerle kıyaslanma fotoğrafları, Şekil 4.10.'da ise plazmaya maruz kalmış çeri domateslerin plazmaya maruz kalmamış çeri domateslerle kıyaslandığı fotoğraflar verilmiştir. Şekil 4.12'de plazmaya maruz kalmış peynirlerle plazmaya maruz kalmamış peynirlerin kıyaslandığı fotoğraflar verilmiştir. Şekil 4.14'te plazmaya maruz kalmış ekşi mayalı ekmeklerle plazmaya maruz kalmamış ekşi mayalı ekmeklerin kıyaslandığı fotoğraflar verilmiştir.

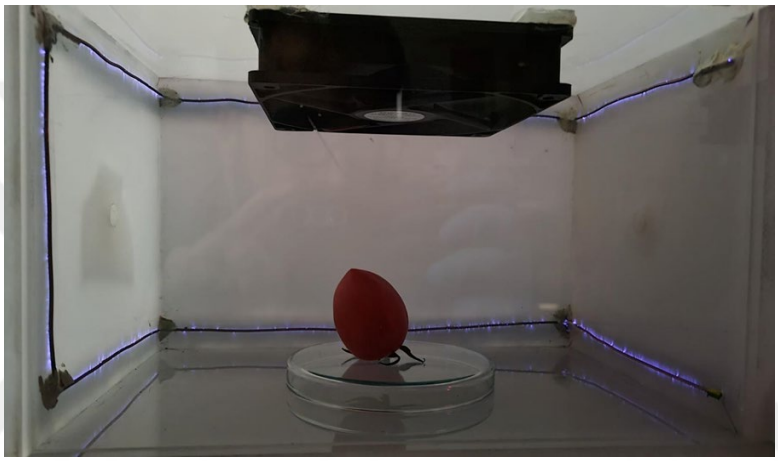


Şekil 4.7. YDBD reaktörü içindeki plazmaya maruz bırakılan çilek fotoğrafı.

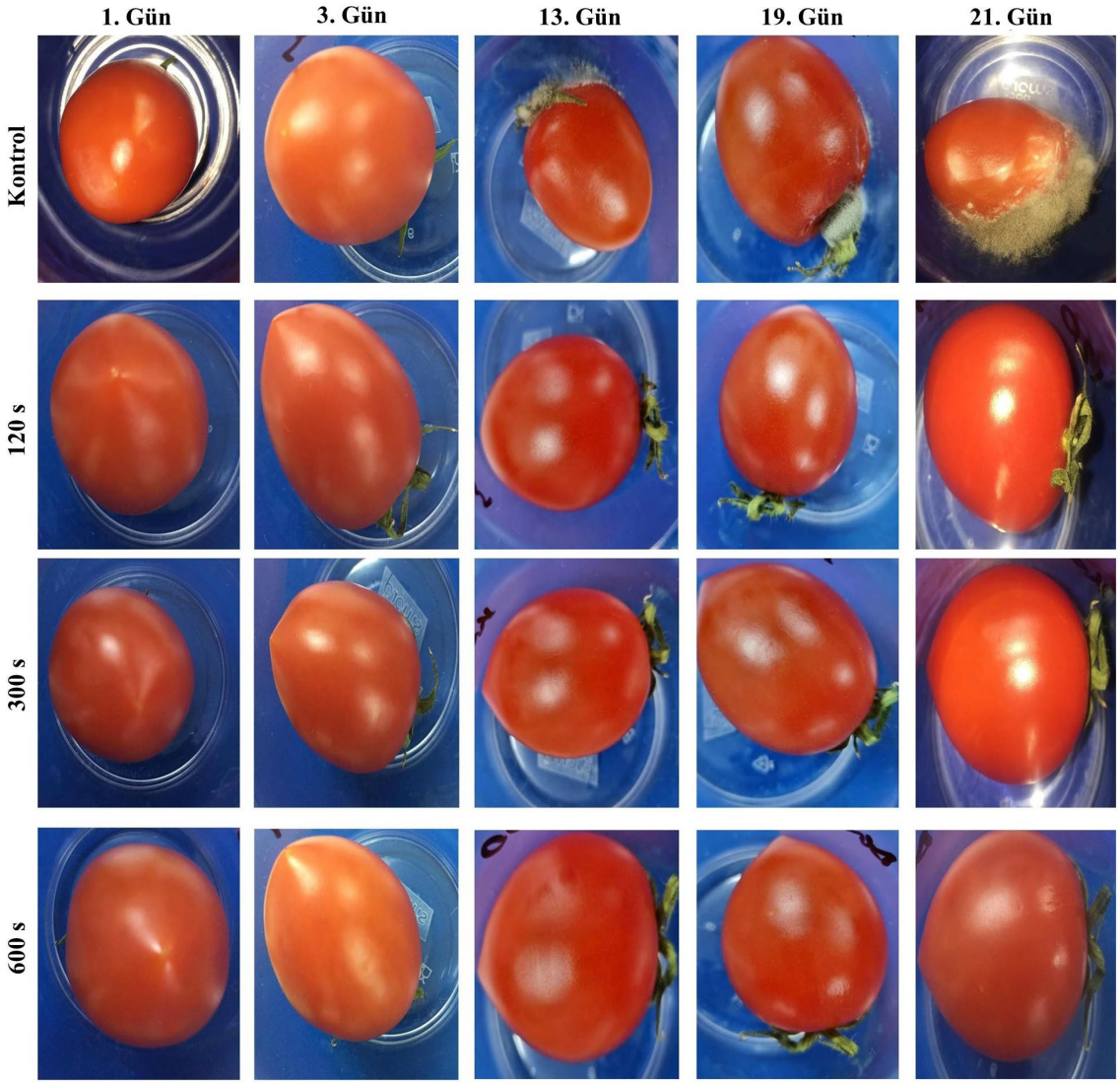


Şekil 4.8. Farklı sürelerde YDBD-hava plazması uygulanan çileklerin zaman içindeki değişim fotoğrafları.

Çilekler, hızlı bir şekilde bozulabilen meyvelerdir. İdeal koşullarda, 0°C'de bile depolama süreleri bir haftadan kısa olabilir. Çileğin raf ömrü, bozulma hızı ve çürümeye duyarlılığı, özellikle *Botrytis cinerea* tarafından neden olunan gri küf nedeniyle oldukça kısadır (Zhang vd., 2010). Şekil 4.8'de görüldüğü gibi plazma işleminden sonra kontrol örneğinde tamamen gri renkli küf oluşumu olduğu ancak 600 saniye plazma işlemi uygulanan örnekteki küflenmenin çok daha az olduğu gözlenmiştir. Burada oluşan küfün *Botrytis cinerea* küfünden kaynaklı olabileceği düşünülmüştür. Aynı zamanda plazma maruziyet süresinin artmasıyla küflenme miktarının azalması önemli bir sonuçtur.



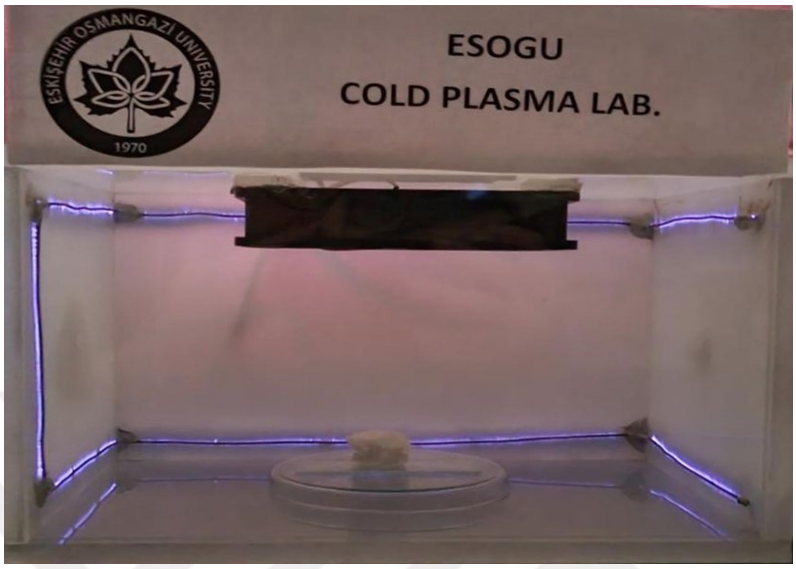
Şekil 4.9. YDBD reaktörü içindeki plazmaya maruz bırakılan çeri domates fotoğrafı.



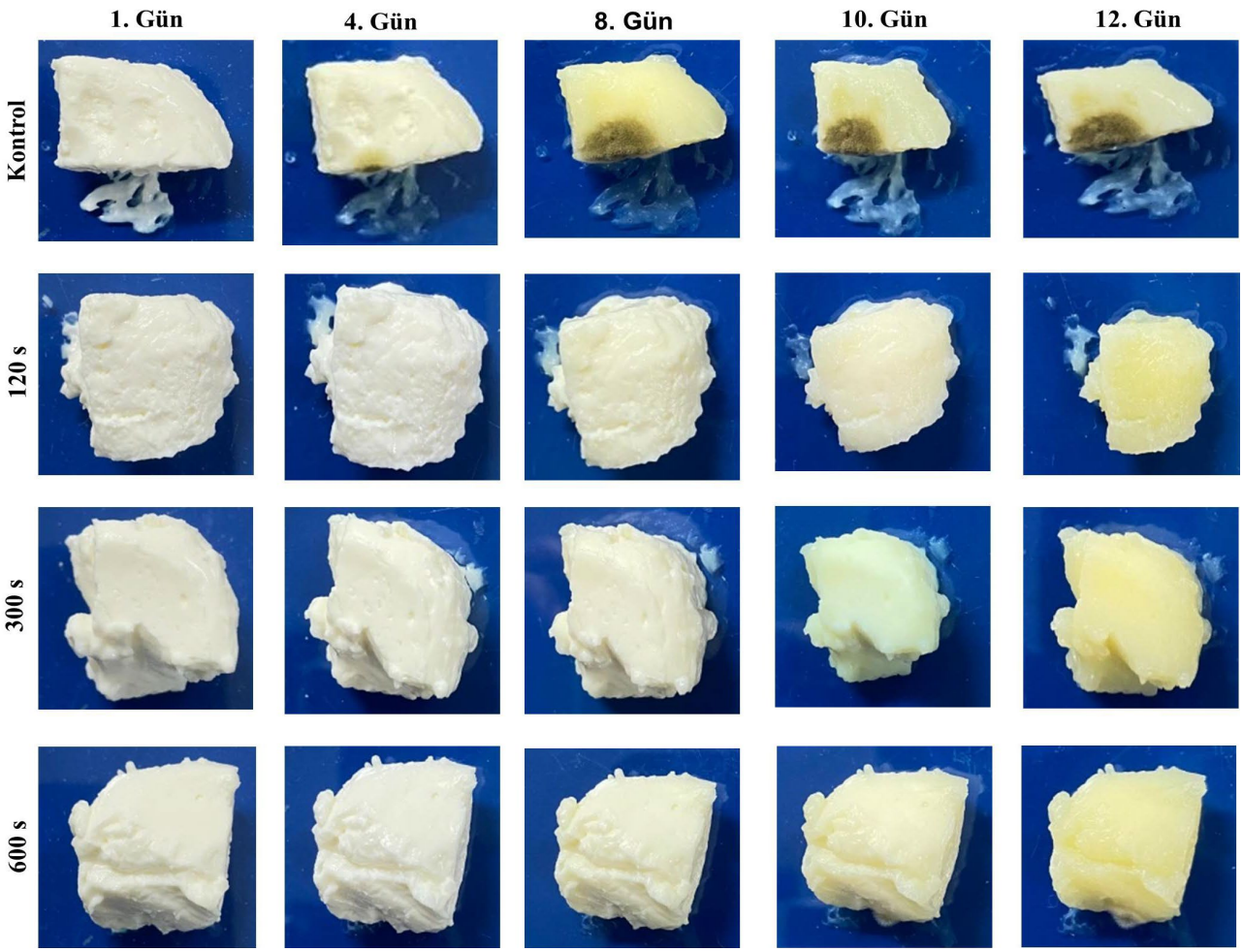
Şekil 4.10. Farklı sürelerde YDBD-hava plazması uygulanan çeri domateslerin zaman içindeki değişim fotoğrafları.

Domatesler, yumuşak dış yüzeyleri sebebiyle mantar enfeksiyonlarına karşı oldukça savunmasızdır. Domatesin sebze ve bitki halinde üzerinde en sık rastlanan mantar türleri *Alternaria* cinsine ait olanlardır (Van de Perre vd., 2014). Domateste karşılaşılabilecek diğer mantar türleri olarak *Penicillium, Mucor, Aspergillus, Rhizopus Oospora (Oidium)* ve *Fusarium* söylenebilir (Kadakal vd., 2011). Şekil 4.10'da görüldüğü üzere kontrol örneğinin yapraklarının kuruduğu ve 13. günden itibaren küflenmeye başladığı ayrıca 21. günde ise artık tamamen küflendiği gözlenmiştir. Çeri domates üzerinde beliren açık yeşil-gri renk, *Alternaria* mantarının bir işareti olabilir (Constable vd., 1969). Çeri domateste oluşan misellerin ise gri-beyaz renkli olmasından dolayı *Mucor*

mantarı olabileceği düşünülmüştür (Kadakal vd., 2011). Plazma işlemi uygulanan örneklerde yaprak kuruması dışında herhangi bir küf gözlenmemiştir.



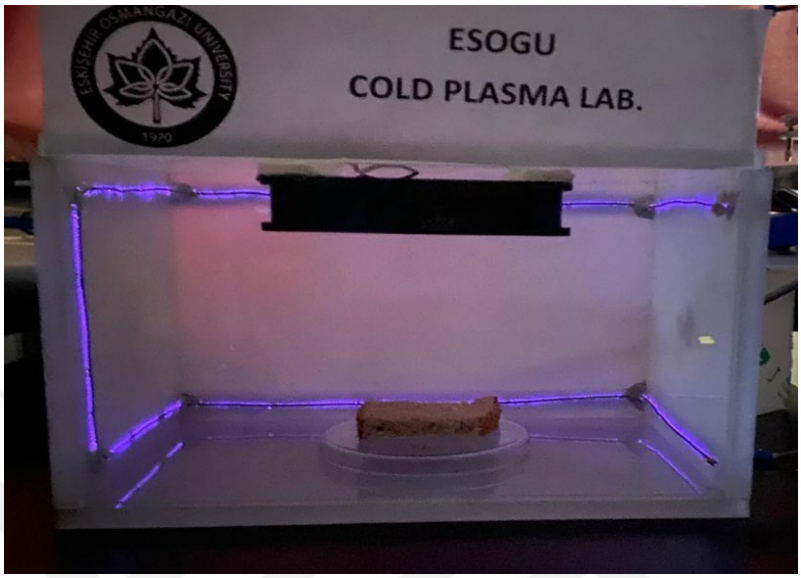
Şekil 4.11. YDBD reaktörü içindeki plazmaya maruz bırakılan peynir fotoğrafı.



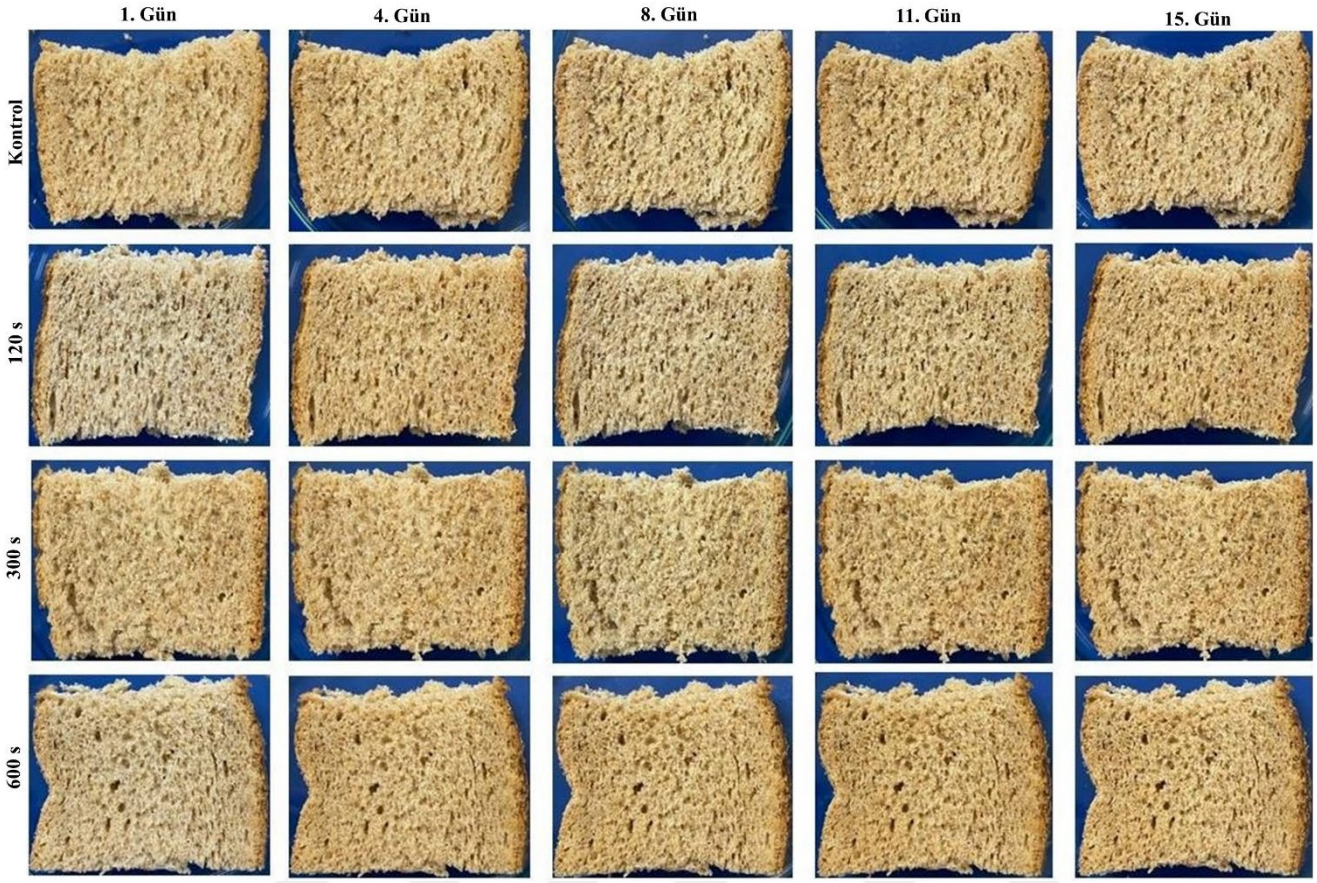
Şekil 4.12. Farklı sürelerde YDBD-hava plazması uygulanan peynirlerin zaman içindeki değişim fotoğrafları.

Belirli peynir türlerinde genellikle birkaç mantar türü baskın olur. Bunların başında *Penicillium* ardından *Aspergillus sp.* türü gelir. Peynirdeki küf türleri mikotoksin üretebilir. Ayrıca peynirler, su aktivitesine göre sınıflandırılabilir. Yumuşak peynirlerde (yüksek su aktivitesi) mantar kontaminasyonu daha kolay olsa da, her peynir türünde de mantarların büyüme potansiyeli bulunur (Kure vd., 2019). Şekil 4.12'de olduğu gibi kontrol örneğinin oldukça küflendiği ve renginin sarardığı gözlenmiştir. Süt bazlı ürünlerde olumsuz değişimlere sebebiyet veren küf ve mayalar, su miktarının düşük olması, tuz oranı yüksekliği, düşük asidite, soğuk ortamlarda büyüyebilme kapasitesi, enzimatik aktiviteler gibi özelliklere sahiptir (Kaynar, 2011). Plazma uygulanan örneklerde ise sadece renklerinin öncesine kıyasla sarardığı ve herhangi bir küf oluşumunun olmadığı

gözlenmiştir. Böylelikle plazma işlemi sırasında peynirde bulunan küf ve mayaların inaktive edilmiş olmasından dolayı herhangi bir küf oluşumuna rastlanmadığı söylenebilir.



Şekil 4.13. YDBD reaktörü içindeki plazmaya maruz bırakılan ekşi mayalı ekmek fotoğrafı.

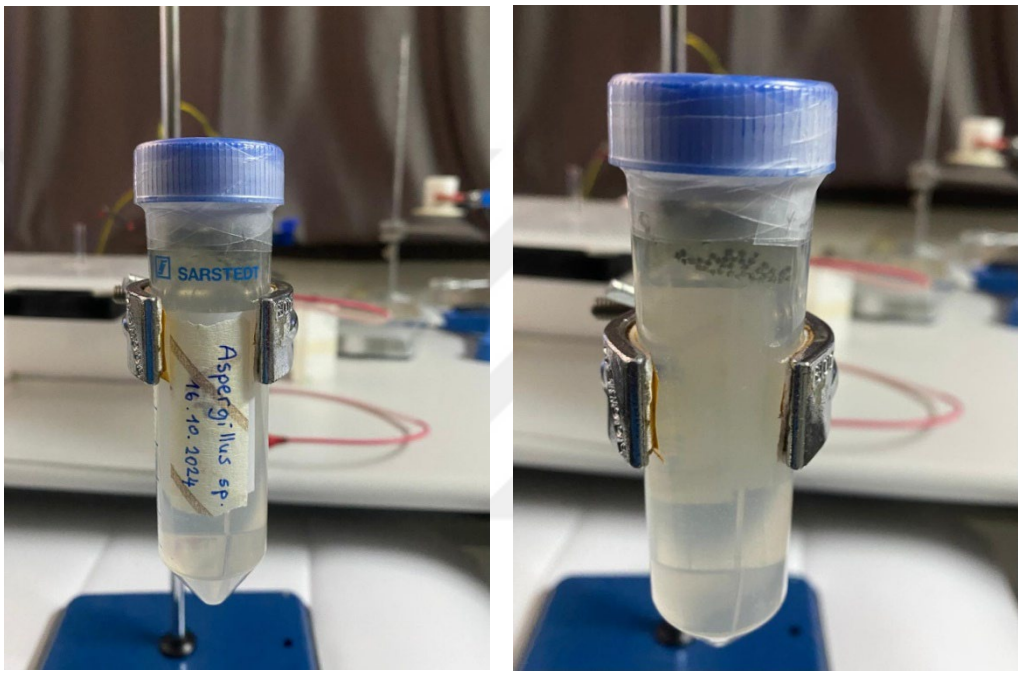


Şekil 4.14. Farklı sürelerde YDBD-hava plazması uygulanan ekşi mayalı ekmeklerin zaman içindeki değişim fotoğrafları.

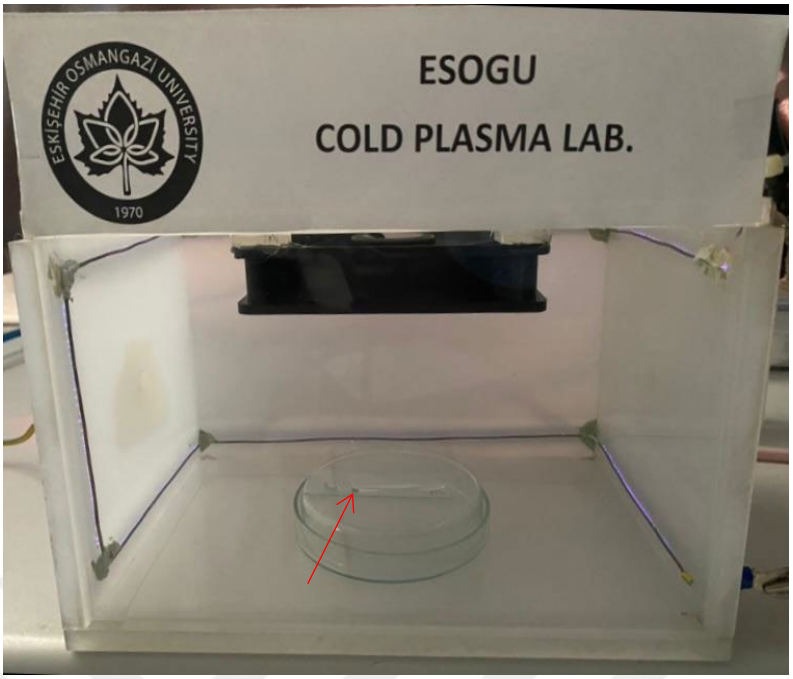
Ekşi mayalı ekmekler, uzun süre küflenmeden kalabilen raf ömrü uzun gıdalar olmakla birlikte bu ekmek türü, esasen mayalar ve laktik asit bakterilerinden oluşan ekşi maya kültürleri kullanılarak üretilir (Kam vd., 2007). Ekşi maya, laktik asit bakterileri (LAB) tarafından gerçekleştirilen asitleşme, nişastanın mikrobiyal hidrolizi ve proteoliz gibi süreçlerle ekmeğin depolama süresindeki fizikokimyasal değişiklikleri etkiler. Bu süreçler, ekmeğin sertliğini azaltmak ve bayatlamayı geciktirmek üzerinde olumlu bir etki yapar (Corsetti vd., 2000). Şekil 4.14'te görüldüğü gibi gözlem süresi boyunca kontrol örneği ve plazma uygulanan örneklerde ekmeklerin sertleşerek kuruması dışında hiçbir değişim gözlenmemiştir. Bu sonuç laktik asit bakterilerinin (LAB) depolama zamanındaki fizikokimyasal değişikliklerin fazlalığından ya da yapımında kullanılan raf ömrü uzatıcı katkı maddelerinden kaynaklandığı söylenebilir.

4.6. *Aspergillus sp.* Üzerine YDBD Uygulamasının FTIR Kullanılarak İncelenmesi

Aspergillus sp. küfü YDBD reaktöründe soğuk plazma maruziyetine bırakıldıktan sonra FTIR incelemesi yapılmıştır. Şekil 4.15'te kullanılan *Aspergillus sp.* küfünün fotoğrafı görülmektedir. Burada *Aspergillus sp.* küfü, on adet plazma maruziyeti uygulanmış numune ve bir kontrol numunesi olacak şekilde çalışılmıştır.

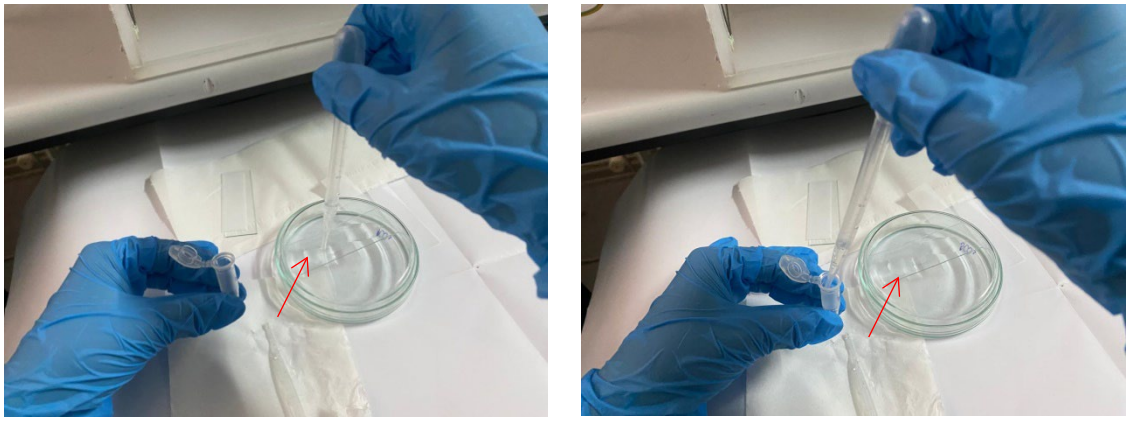


Şekil 4.15. *Aspergillus sp.* küfünün fotoğrafı.

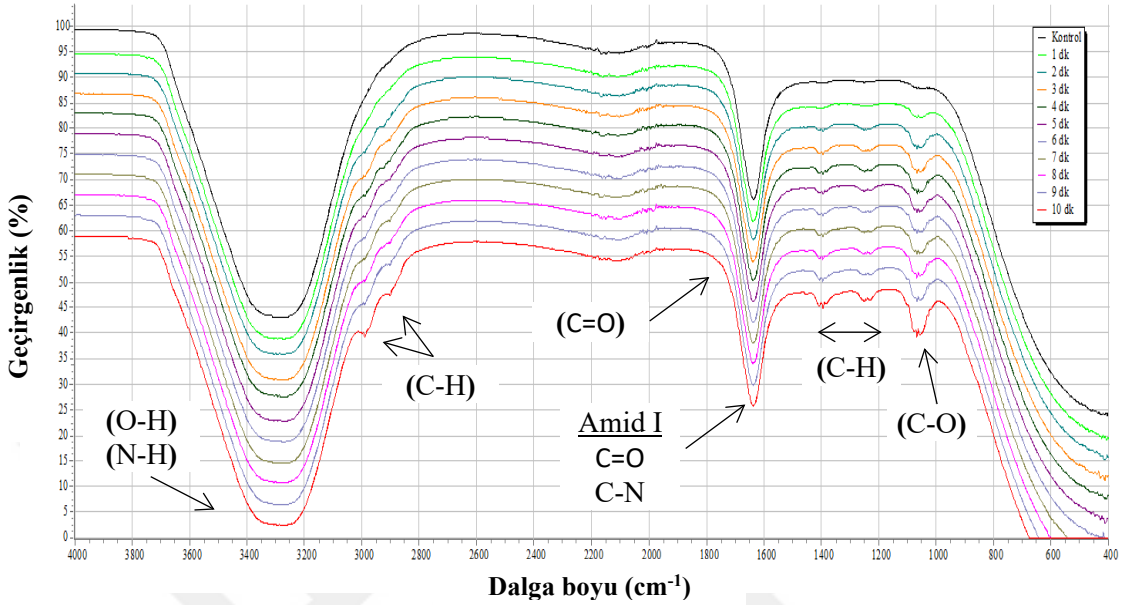


Şekil 4.16. YDBD reaktörü içerisindeki *Aspergillus sp.* küfünün fotoğrafı.

Aspergillus sp. küfü, önce Şekil 4.17'de görülüğü gibi pastör pipeti yardımıyla mikroskop camı üzerine, her bir numune için 1,5 ml olacak şekilde damlatılmıştır. Sonrasında Şekil 4.16'da görüldüğü gibi, soğuk plazma maruziyetine bırakılan numuneler sırasıyla 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540 ve 600 saniye olmak üzere farklı süreler uygulanmıştır. Son olarak, bu on numune ve bir kontrol numunesi FTIR yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir.

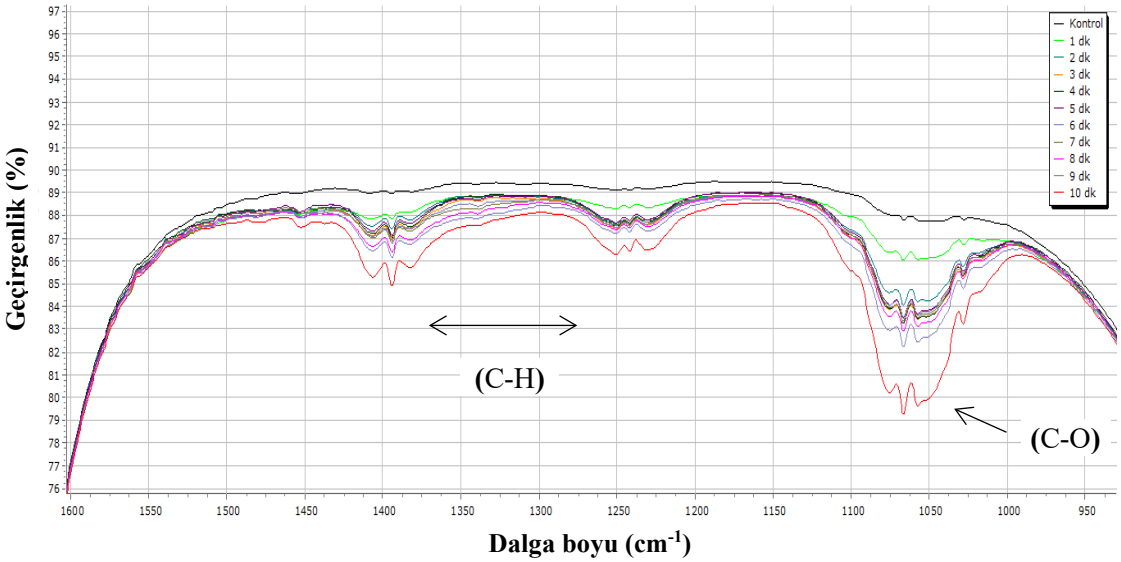


Şekil 4.17. Maruziyet sonrasında YDBD reaktöründen alınan *Aspergillus sp.* küfünün fotoğrafı.

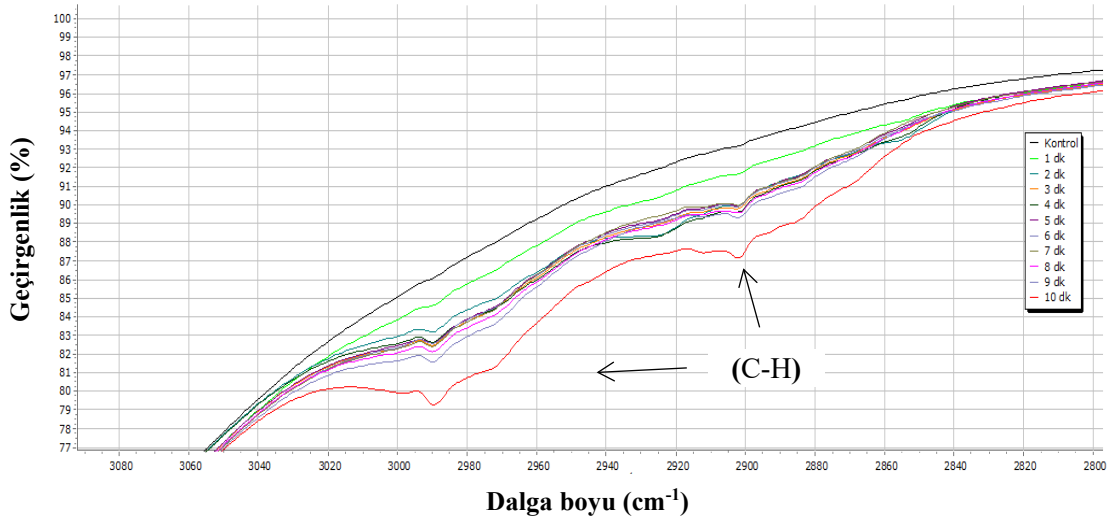


Şekil 4.18. *Aspergillus sp.* küfü üzerine YDBD uygulaması sonrasında alınan FTIR spektrumu.

Doğrudan küf üzerine soğuk plazma uygulaması yapılmış ve soğuk plazma uygulaması yapılmamış *Aspergillus sp.* küflerinin FTIR analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ise Şekil 4.18'de YDBD uygulaması sonrasında alınan FTIR spektrumu, Şekil 4.19a'da ise 950-1600 cm^{-1} ve Şekil 4.19b'de 2800-3080 cm^{-1} arasındaki grafiği parça halinde verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.19. a) FTIR spektrumunun 950-1600 cm^{-1} arasındaki grafiği. **b)** FTIR spektrumunun 2800-3080 cm^{-1} arasındaki grafiği.

Aspergillus sp. küfü hücreleri, 600 saniye plazma uygulamasından sonra 2800-3000 cm^{-1} arasındaki bölgedeki pikler, sırasıyla yağ asidi veya selülozdaki metilen grubunun C-H asimetrik ve simetrik gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir (Šimončicová vd., 2018). 950-1150 cm^{-1} ve 1200-1700 cm^{-1} arasındaki iki farklı bölgede, piklerde sinyal yoğunluklarının arttığı gözlemlenmiştir. Spektrumların kısa bölgesi, C-O gerilme titreşimi ve aromatik -CH gerilme titreşimine; uzun bölgesi ise amid I (C=O

gerilme titreşimi ve NH deformasyonu), amid II (NH bantlaşması), SO_3 grubu ve proteinlerin -CN gerilme titreşimine karşılık gelmektedir (Šimončicová vd., 2018). Plazma uygulanan örneklerde, C=O ve C-O gruplarının gerilme titreşimlerinin yoğunluğundaki artış, lipidler ve polisakkaritler gibi biyomoleküllerin oksidasyonunu gösterebilir (Šimončicová vd., 2018). 3400 ve 3100 cm^{-1} arasındaki geniş bant, OH ve NH germe titreşimlerini temsil etmektedir. Bu değişiklikler, plazma maruziyeti sonrasında dehidrasyon ve muhtemelen hücre duvarındaki kitin asetamido grubundaki modifikasyonlardan kaynaklanmaktadır.

Görüldüğü üzere, soğuk plazma uygulanan *Aspergillus sp.* küfünde, plazmanın gıda üzerindeki etkisiyle küf hücrelerindeki bahsedilen bağların kırılması sonucu, gıda üzerinde üremesi engellenerek, gıda küflenmesini geciktirdiği gözlemlenmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Antimikrobiyal plazma etkileri, yara iyileşmesi, kanser/tümör tedavisi veya patojen kaynaklı cilt veya diş hastalıkları gibi terapötik uygulamalar için umut vadetmektedir, ayrıca hijyen, gıda ve tarım işleme alanlarında da kullanılmaktadır. Dielektrik Bariyer Deşarj (DBD) reaktörleri, atmosferik havayı bir gaz olarak kullanabilirler, vakum gerektirmezler ve basit, ucuz ve kullanımı kolay oldukları için antimikrobiyal amaçlar için en yaygın kullanılan sistemlerdir. Bununla birlikte, DBD plazma biyolojik örnek üzerine doğrudan uygulandığında, deşarj akımı biyolojik örnekten geçebilir, bu da plazmanın kıvılcım deşarjına dönüşmesine ve böylece biyolojik örneğe zarar vermesine neden olabilir. Yüzey Dielektrik Bariyer Deşarj (YDBD) plazmaları, çok büyük hacimlerde termal olmayan plazmanın uygulanmasında büyük avantajlar sunar, çünkü örnek üzerine uzaktan plazma üretebilirler. YDBD plazmaları genellikle örnek konulan kapak üzerinde üretilir ve plazma türlerinin örneğe ulaşması beklenirken, bu çalışmada YDBD plazmaları plazma ünitesinin üzerinde üretildi. Değişen boyutlarda ve özelliklerdeki örnekler için kullanılabilen antimikrobiyal amaçlar için yeni bir YDBD reaktörü üretildi. Gram-negatif *E. coli* ve *P. aeruginosa*, Gram-pozitif *S. aureus* ve *E. faecalis* planktonik bakteriler, soğuk plazmaya maruz bırakılarak 600 saniye süreyle inaktive edildi. 6,2 litrelik kapasitesi olan, biyo-uygulamalar için geliştirilen, pratik, kullanıcı dostu 31,4 W gücünde bir plazma sterilizasyon ünitesi geliştirildi.

YDBD plazma üretimi, plazma türlerine yarı doğrudan bir uygulama yöntemidir ve bu nedenle biyolojik uygulamalarda yanma ve dokunun kuruması gibi olası negatif etkileri hafifletmek mümkündür. Yeni bir YDBD plazma reaktörü geliştirildi ve antibakteriyel bir uygulamada kullanıldı. Bu reaktör, atmosferik havada termal olmayan plazma üreten, yüksek antimikrobiyal aktiviteye sahip olan UV radyasyonu, atomik oksijen, ozon ve NO molekülleri ürettiği gözlemlenmiştir. Bu reaktör, gıda, tarım, diş ve tıp uygulamaları dahil olmak üzere antibakteriyel amaçlar için kolayca kullanılabilen bir cihazdır ve Gram-negatif *E. coli* ve *P. aeruginosa* ile Gram-pozitif *S. aureus* ve *E. faecalis* planktonik bakteriler için test edilmiştir. Bu bakteriler, YDBD plazmaya maruz bırakılarak 600 saniye süreyle inaktive edilmiştir.

YDBD plazma reaktörü kullanılarak çilek, çeri domates, peynir, ekşi mayalı ekmek ve *Aspergillus sp.* küfü soğuk plazmaya maruz bırakıldı. Buradaki gıdalar raf ömrü arttırılması açısından test edilirken, *Aspergillus sp.* küfü ise gıdalarda da oluşabilen bir küf çeşidi olması açısından, bir küfün de direkt plazma maruziyeti sonuçlarını görebilmek için kullanıldı. Uygulama sonrasında fotoğraflanan gıdalar ve *Aspergillus sp.* küfü maruziyet sürelerine göre de değişiklik gösterebilmekle birlikte inaktive edilen küflerle beraber başarılı ve gözle görülebilir sonuçlar elde edildi. Burada *Aspergillus sp.* küfünün spor oluşumu da YDBD reaktörü kullanılarak incelenebilirdi. Farklı gıdalarda da sonuçları gözlemleyebilmek için yine meyve ve sebze üzerindeki denemelere de devam edilmelidir. Aynı zamanda çalışmamızda kullandığımız mikroorganizmalar için atmosferimizdeki ozon tabakası sayesinde UV'den korunmamız sebebiyle, direkt olarak plazmaya maruz bırakılan mikroorganizmaların UV maruziyetiyle aslında alışkın olmadıkları bir ortam olmasından dolayı inaktive edildiği de söylenebilir.

YDBD reaktörünün mikro-deşarjların filament akım şiddeti 37,4 mA kadar yüksektir. Ortalama güç 31,4 W iken enerji yoğunluğu 104,7 J/L'dir, bu da önemli miktarda ozon üretildiğini göstermektedir. YDBD reaktöründe 10 mm kalınlığındaki dielektrik, plazmanın uygulama geriliminde ciddi bir azalmaya neden olurken, kalın dielektrik tabakada depolanan yüklerin hızlı deşarjı, plazma geriliminin negatif yarı döngüsünde çok ciddi bir mikro-deşarj akım sıçramasına neden olmuştur. Bu nanosaniyelik sıçrama, pozitif yarı döngüdeki mikro-deşarjlar aracılığıyla plazma türlerinin oluşumu gibi ciddi bir katkıda bulunur. Burada kullandığımız dielektrik kalınlığı biraz daha ince de yapılarak denenebilirdi. YDBD reaktörü, yüksek antimikrobiyal etkili UV bölgesinde N_2 ve N_2^+ uyarım geçişlerinden radyasyon üretirken aynı zamanda atomik oksijen ve NO moleküllerini üretir.

Çalışmamız, YDBD reaktörümüzün mevcut literatürdeki diğer reaktörlere göre daha büyük bir hacme sahip olduğunu ve daha hızlı inaktivasyona neden olduğunu gösterdi. Diğer YDBD reaktörlerine göre, gıda, tarım, diş ve tıp endüstrileri gibi alanlarda pratik uygulamaları bulunmaktadır. En büyük avantajlarından biri gaz temin etmek yerine AC gerilimle çalışmasıdır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Abdelaziz, A. A., Seto, T., Abdel-Salam, M., & Otani, Y. (2014). *Influence of N 2/O 2 mixtures on decomposition of naphthalene in surface dielectric barrier discharge based reactor.* Plasma Chemistry and Plasma Processing, 34, 1371-1385.

Abdelaziz, A.A., Ishijima, T., Seto, T., Osawa, N., Wedaa, H., Otani, Y., (2016). *Characterization of surface dielectric barrier discharge influenced by intermediate frequency for ozone production.* Plasma Sources Science and Technology, 25, 035012. https://doi.org/10.1088/0963-0252/25/3/035012

Akan, T., Durmuş, Ç. (2023). A surface dielectric barrier discharge reactor for biological treatments. *Journal of Electrostatics*, *126*, 103863. https://doi.org/10.1016/j.elstat.2023.103863

Akan, T., (2014). Plazma TIP. Plazma Teknolojileri (pp.199-213), Ankara: Ürün Yayıncılık.

Ambrico, P. F., Šimek, M., Morano, M., Angelini, R. M. D. M., Minafra, A., Trotti, P., ... & Faretra, F. (2017). *Reduction of microbial contamination and improvement of germination of sweet basil (Ocimum basilicum L.) seeds via surface dielectric barrier discharge.* Journal of Physics D: Applied Physics, 50(30), doi: 10.1088/1361-6463/aa77c8

Barjasteh, A., Dehghani, Z., Lamichhane, P., Kaushik, N., Choi, E. H., & Kaushik, N. K. (2021). *Recent progress in applications of non-thermal plasma for water purification, bio-sterilization, and decontamination.* Applied Sciences, 11(8), 3372.

Bednar, N., Matović, J., & Stojanović, G. (2013). *Properties of surface dielectric barrier discharge plasma generator for fabrication of nanomaterials.* Journal of Electrostatics, 71(6), 1068-1075. doi:10.1016/j.elstat.2013.10.010

Benard N. and Moreau E. 2014 *Electrical and mechanical characteristics of surface AC dielectric barrier discharge plasma actuators applied to airflow control*.Exp. Fluids 55 1846

KAYNAKLAR DİZİNİ

Bhat, R. (2013). Potential use of fourier transform infrared spectroscopy for identification of molds capable of producing mycotoxins. *International journal of food properties*, *16*(8), 1819-1829. https://doi.org/10.1080/10942912.2011.609629

Boonyawan, D., Lamasai, K., Umongno, C., Rattanatabtimtong, S., Yu, L., Kuensaen, C., Maitip, J., Thana, P., (2022). *Surface dielectric barrier discharge plasma–treated pork cut parts: bactericidal efficacy and physiochemical characteristics.* Heliyon, 8 e10915. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10915

Bourke, P., Ziuzina, D., Han, L., Cullen, P. J., & Gilmore, B. F. (2017). *Microbiological interactions with cold plasma.* Journal of applied microbiology, 123(2), https://doi.org/10.1111/jam.13429

Constable, M. M. (1969). Effects of several genera of molds on tomatoes and in mold counts (Master's thesis, The Ohio State University). Corsetti, A., Gobbetti, M., De Marco, B., Balestrieri, F., Paoletti, F., Russi, L., & Rossi, J. (2000). Combined effect of sourdough lactic acid bacteria and additives on bread firmness and staling. *Journal of agricultural and food chemistry*, *48*(7), 3044-3051.

Dijksteel, G.S., lrich, M.M., Vlig, M., Sobota, A., Middelkoop, E., Boekema, B.K., (2020). *Safety and bactericidal efficacy of cold atmospheric plasma generated by a flexible surface Dielectric Barrier Discharge device against Pseudomonas aeruginosa in vitro and in vivo,* Annals of Clinical Microbiology and Antimicrobials, 19 37. https://doi.org/10.1186/s12941-020-00381-z

Friedrich, J.F., & Meichsner, J., (2022). *Nonthermal Plasmas for Materials Processing,* John Wiley & Sons.

Guikema, J., Miller, N., Niehof, J., Klein, M., & Walhout, M. (2000). *Spontaneous pattern formation in an effectively one-dimensional dielectric-barrier discharge system*. Physical review letters, 85(18), 3817.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Guo, Y., Fang, M., Zhang, L., Sun, J., Wang, X., Tie, J., ... & Luo, H. (2022). *Study on flexible surface dielectric barrier discharge plasma film for in situ inactivation of bacteria and viruses.* Applied Physics Letters, 121(7). https://doi.org/10.1063/5.0100114

Guo, Y., Liu, P., Zhang, L., Peng, S., Wang, X., Luo, H., & Wu, G. (2021). *Disinfection of Escherichia coli in ice by surface dielectric barrier discharge plasma.* Applied Physics Letters, 119(9). https://doi.org/10.1063/5.0064020

Hoppanová, L., Dylíková, J., Kováčik, D., Medvecká, V., Ďurina, P., Kryštofová, S., ... & Kaliňáková, B. (2020). The effect of cold atmospheric pressure plasma on Aspergillus ochraceus and ochratoxin A production. *Antonie van Leeuwenhoek*, *113*, 1479-1488.

Hoppanová, L., Dylíková, J., Kováčik, D., Medvecká, V., Ďurina, P., Kryštofová, S., ... & Kaliňáková, B. (2022). Non-thermal plasma induces changes in aflatoxin production, devitalization, and surface chemistry of Aspergillus parasiticus. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *106*(5), 2107-2119.

Hozumi Y., Seto T., Hirasawa M., Tsuji M. and Okuyama A. (2009) *Kinetics of microplasma atmospheric ion generation correlated with discharge current*, J. Electrost. 67 1–6

Jeon J, Klaempfl T G., Zimmermann J L., Morfill G. E. and Shimizu T. (2014) *Sporicidal properties from surface microdischarge plasma under different plasma conditions at different humidities.* New J. Phys. 16 103007

Jeon, J., Rosentreter, T. M., Li, Y., Isbary, G., Thomas, H. M., Zimmermann, J. L., ... & Shimizu, T. (2014). *Plasma Processes and Polymers, Bactericidal agents produced by Surface Micro-Discharge (SMD) plasma by controlling gas compositions. 11*(5), 426-436.

Jodzis, S., Smoliński, T., & Sowka, P. (2011). *Ozone synthesis under surface discharges in oxygen: application of a concentric actuator.* IEEE Transactions on Plasma Science, 39(4), 1055-1060.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Kadakal, Ç., Artık, N., & Nas, S. (2011). Domates Doku Ve Küf Karakteristikleri, Domates Ürünlerinde Küf Sayımı Ve Küfü Azaltma Olanakları. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *7*(2), 251-260.

Kam, P. V., Bianchini, A., & Bullerman, L. B. (2007). Inhibition of mold growth by sourdough bread cultures. *RURALS: Review of undergraduate research in agricultural and life sciences*, *2*(1), 5.

Kasa, R. A., Juswono, U. P., & Santjojo, D. J. (2023). *The Effects of Reactive Oxygen and Nitrogen Species (RONS) Produced by Surface Dielectric Barrier Discharge (SDBD) Non-Thermal Plasma with Treatment Time and Distance Variations to Kill Escherichia coli* Science and Technology Indonesia, 8. https://doi.org/10.26554/sti.2023.8.1.45-51

Kaynar, P. (2011). Ülkemiz peynirleri üzerine mikrobiyolojik araştırmalar. *Türk Mikrobiyol Cem Derg*, *41*(1), 1-8. https://doi.org/10.5222/TMCD.2011.001

Kure, C. F., & Skaar, I. (2019). The fungal problem in cheese industry. *Current Opinion in Food Science*, *29*, 14-19. https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.07.003

Kong, M. G., Kroesen, G., Morfill, G., Nosenko, T., Shimizu, T., Van Dijk, J., & Zimmermann, J. L. (2009). *Plasma medicine: an introductory review.* new Journal of Physics, 11(11), doi: 10.1088/1367-2630/11/11/115012

Laroque, D. A., Seó, S. T., Valencia, G. A., Laurindo, J. B., & Carciofi, B. A. M. (2022). *Cold plasma in food processing: Design, mechanisms, and application.* Journal of Food Engineering, 312, 110748.doi:10.1016/j.jfoodeng.2021.110748

Liu, X., Wang, Z., Li, J., Wang, Y., Sun, Y., Dou, D., ... & Liu, D. (2022). *Inactivation of E. coli, S. aureus, and Bacteriophages in Biofilms by Humidified Air Plasma.* International Journal of Molecular Sciences, 23(9), 4856. https://doi.org/10.3390/ijms23094856

KAYNAKLAR DİZİNİ

Liu, Y., Liu, D., Zhang, J., Sun, B., Luo, S., Zhang, H., ... & Kong, M. G. (2021). *Fluid model of plasma–liquid interaction: The effect of interfacial boundary conditions and Henry's law constants.* AIP Advances, 11(5). https://doi.org/10.1063/5.0042945

Maisch, T., Shimizu, T., Li, Y. F., Heinlin, J., Karrer, S., Morfill, G., & Zimmermann, J. L. (2012). *Decolonisation of MRSA, S. aureus and E. coli by cold-atmospheric plasma using a porcine skin model in vitro.* PloS one, 7(4), https://doi.org/10.1371/journal.pone.0034610

Malik M.A., Hughes D., Heller R. and Schoenbach K.H. (2015) *Surface plasmas versus volume plasma: energy deposition and ozone generation in air and oxygen* Plasma Chem. Plasma Process. 35 697–704

Malik, M. A. (2014). *Ozone synthesis using shielded sliding discharge: effect of oxygen content and positive versus negative streamer mode.* Industrial & Engineering Chemistry Research, 53(31), https://doi.org/10.1021/ie5018805

Malik, M. A., Kolb, J. F., Sun, Y., & Schoenbach, K. H. (2011). *Comparative study of NO removal in surface-plasma and volume-plasma reactors based on pulsed corona discharges.* Journal of hazardous materials, 197, https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.09.079

Malik, M. A., Schoenbach, K. H., & Heller, R. (2014). *Coupled surface dielectric barrier discharge reactor-ozone synthesis and nitric oxide conversion from air.* Chemical Engineering Journal, 256, https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.07.003

Masuda, S., Akutsu, K., Kuroda, M., Awatsu, Y., & Shibuya, Y. (1988). *A ceramic-based ozonizer using high-frequency discharge.* IEEE Transactions on Industry Applications, 24(2), doi: 10.1109/28.2860

Morfill, G. E., Shimizu, T., Steffes, B., & Schmidt, H. U. (2009). *Nosocomial infections—a new approach towards preventive medicine using plasmas.* New Journal of Physics, 11(11), doi: 10.1088/1367-2630/11/11/115019

Mošovská, S., Medvecká, V., Valík, Ľ., Mikulajová, A., & Zahoranová, A. (2023). *Modelling of inactivation kinetics of Escherichia coli, Salmonella Enteritidis and*

KAYNAKLAR DİZİNİ

Bacillus subtilis treated with a multi-hollow surface dielectric barrier discharge plasma. Scientific Reports, 13(1), 12058.https://doi.org/10.1038/s41598-023-38892-2

Niu, G., Knodel, A., Burhenn, S., Brandt, S., & Franzke, J. (2021). *Miniature dielectric barrier discharge (DBD) in analytical atomic spectrometry.* Analytica Chimica Acta, 1147, 211-239. doi:10.1016/j.aca.2020.11.034

Nupangtha, W., Kuensaen, C., Ngamjarurojana, A., Chomdej, S., & Boonyawan, D. (2021). A surface dielectric barrier discharge non-thermal plasma to induce cell death in colorectal cancer cells. AIP Advances, 11(7).

Ollegott, K., Wirth, P., Oberste-Beulmann, C., Awakowicz, P., & Muhler, M. (2020). *Fundamental properties and applications of dielectric barrier discharges in plasma-catalytic processes at atmospheric pressure.* Chemie Ingenieur Technik, *92*(10), https://doi.org/10.1002/cite.202000075

Pai, K.K., Singarapu, K., Jacob, J.D., Madihally, S.V., (2015). *Dose dependent selectivity and response of different types of mammalian cells to surface dielectric barrier discharge (SDBD) plasma,* Plasma Process Polym, 12 666-677. https://doi.org/10.1002/ppap.201400134

Pai, K., Timmons, C., Roehm, K.D., Ngo, A., Narayanan, S.S., Ramachandran, A., Jacob, J.D., Ma, L.M., S.V. Madihally, (2018). *Investigation of the Roles of Plasma Species Generated by Surface Dielectric Barrier Discharge,* Sci Rep-Uk, 8 16674. https://doi.org/10.1038/s41598-018-35166-0

Park, Y., Oh, K. S., Oh, J., Seok, D. C., Kim, S. B., Yoo, S. J., & Lee, M. J. (2018). *The biological effects of surface dielectric barrier discharge on seed germination and plant growth with barley.* Plasma Processes and Polymers, 15(2), 1600056. https://doi.org/10.1002/ppap.201600056

Pavlovich, M. J., Clark, D. S., & Graves, D. B. (2014). *Quantification of air plasma chemistry for surface disinfection.* Plasma Sources Science and Technology, 23(6), doi: 10.1088/0963-0252/23/6/065036.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Pekárek, S. (2012). *Experimental study of surface dielectric barrier discharge in air and its ozone production.* Journal of Physics D: Applied Physics, 45(7), 075201. Doi:10.1088/0022-3727/45/7/075201

Pekárek, S., Mikeš, J., Červenka, M., & Hanuš, O. (2021). *Air supply mode effects on ozone production of surface dielectric barrier discharge in a cylindrical configuration.* Plasma Chemistry and Plasma Processing, 41(3), 779-792. doi:10.1007/s11090-021-10154-x

Pemen, A., Beckers, F., Van Heesch, E., Characterization of a surface dielectric barrier discharge, in: Proc. 19th ISPC, 2009, pp. 1-4.

Portugal, S., Choudhury, B., & Cardenas, D. (2022). *Advances on aerodynamic actuation induced by surface dielectric barrier discharges.* Frontiers in Physics, 797. https://doi.org/10.3389/fphy.2022.923103

Pourbagher, R., Abbaspour-Fard, M. H., Sohbatzadeh, F., & Rohani, A. (2021). *Inhibition of enzymes and Pseudomonas tolaasii growth on Agaricus bisporus following treatment with surface dielectric barrier discharge plasma.* Innovative Food Science & Emerging Technologies, 74, https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102833

Ripin, B., Decoste, R., Doschek, G., Feldman, U., Lehmberg, R., McLean, E., & Stamper, J. (1977). *Optical diagnostics of laser-fusion plasmas.* IEEE Journal of Quantum Electronics, 13(9), 846-846.

Saif, F. A., Yaseen, S. A., Alameen, A. S., Mane, S. B., & Undre, P. B. (2021). Identification and characterization of *Aspergillus species* of fruit rot fungi using microscopy, FT-IR, Raman and UV–Vis spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *246*, 119010. https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.119010

Samukawa, S., Hori, M., Rauf, S., Tachibana, K., Bruggeman, P., Kroesen, G., ... & Mason, N. (2012). *The 2012 plasma roadmap.* Journal of Physics D: Applied Physics, 45(25), 253001. https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/25/253001

KAYNAKLAR DİZİNİ

Schlegel, J., Köritzer, J., Boxhammer, V., (2013) *Plasma in cancer treatment*, Clinical Plasma Medicine, 1 2-7. https://doi.org/10.1016/j.cpme.2013.08.001

Seto, T., Kwon, S. B., Hirasawa, M., & Yabe, A. (2005). *Decomposition of toluene with surface-discharge microplasma device.* Japanese journal of applied physics, 44(7R), doi: 10.1143/JJAP.44.5206

Shimizu, K., Yamada, M., Kanamori, M., & Blajan, M. (2010). *Basic study of bacteria inactivation at low discharge voltage by using microplasmas.* IEEE Transactions on Industry Applications, 46(2), doi: 10.1109/TIA.2010.2040053

Šimončicová, J., Kaliňáková, B., Kováčik, D., Medvecká, V., Lakatoš, B., Kryštofová, S., ... & Zahoranová, A. (2018). Cold plasma treatment triggers antioxidative defense system and induces changes in hyphal surface and subcellular structures of Aspergillus flavus. *Applied microbiology and biotechnology*, *102*, 6647-6658. https://doi.org/10.1007/s00253-018-9118-y

Sohbatzadeh, F., Yazdanshenas, H., Soltani, A.-H., Shabannejad, A., (2021). *An innovative strategy to rapidly inactivate 8.2-log Enterococcus faecalis in fresh pineapple juice using cold atmospheric plasma.* Sci Rep-Uk, 11 16010. https://doi.org/10.1038/s41598-021-95452-2

Song, Y., Liu, D., Lu, Q., Xia, Y., Zhou, R., Yang, D., ... & Wang, W. (2015). *An atmospheric-pressure large-area diffuse surface dielectric barrier discharge used for disinfection application.* IEEE Transactions on Plasma Science, 43(3), 821-827. https://doi.org/10.1109/Tps.2015.2393952

Tarım Ve Orman Bakanlığı (2014). https://www.tarimorman.gov.tr/GKGM/Belgeler/Tuketici_Bilgi_Kosesi/E-Bultenler/04.pdf

Theinkom, F., Singer, L., Cieplik, F., Cantzler, S., Weilemann, H., Cantzler, M., Hiller, K.-A., Maisch, T., Zimmermann, J.L., (2019). *Antibacterial efficacy of cold atmospheric plasma against Enterococcus faecalis planktonic cultures and biofilms in vitro,* PLoS One, 14 e0223925. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223925

KAYNAKLAR DİZİNİ

Van de Perre, E., Deschuyffeleer, N., Jacxsens, L., Vekeman, F., Van Der Hauwaert, W., Asam, S., ... & De Meulenaer, B. (2014). Screening of moulds and mycotoxins in tomatoes, bell peppers, onions, soft red fruits and derived tomato products. Food Control, 37, 165-170. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.09.034

Von Keudell, A., & Schulz-Von Der Gathen, V. (2017). Foundations of low-temperature plasma physics—an introduction. *Plasma Sources Science and Technology*, *26*(11), 113001.

Von Woedtke, T., Laroussi, M., & Gherardi, M. (2022). *Foundations of plasmas for medical applications.* Plasma Sources Science and Technology, 31(5), https://doi.org/10.1088/1361-6595/ac604f

Von Woedtke, T., Reuter, S., Masur, K., & Weltmann, K. D. (2013). *Plasmas for medicine.* Physics Reports, 530(4), https://doi.org/10.1016/j.physrep.2013.05.005

, Y., Li, Y., Jia, M., Song, H., & Liang, H. (2013). Effect of pressure on the emission characteristics of surface dielectric barrier discharge plasma. Sensors and Actuators A: Physical, 203, 1-5. doi:10.1016/j.sna.2013.07.023 Wu

Yao, S., Wu, Z., Han, J., Tang, X., Jiang, B., Lu, H., ... & Kodama, S. (2015). *Study of ozone generation in an atmospheric dielectric barrier discharge reactor.* Journal of Electrostatics, 75, 35-42.https://doi.org/10.1016/j.elstat.2015.03.001

Zhang, H., Ma, L., Jiang, S., Lin, H., Zhang, X., Ge, L., & Xu, Z. (2010). Enhancement of biocontrol efficacy of Rhodotorula glutinis by salicyclic acid against gray mold spoilage of strawberries. *International journal of food microbiology*, *141*(1-2), 122-125. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2010.04.022

Zhao, L., Zheng, J., Yan, W., Qian, J., Zhang, J., Wang, J., ... & Chen, Y. (2025). Combined high voltage atmospheric cold plasma and ultraviolet-cold plasma inhibited Aspergillus flavus growth and improved physicochemical properties of protein in peanuts. *Food Chemistry*, *464*, 141607. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141607

KAYNAKLAR DİZİNİ

Zhao, X., Wang, N., Lu, Y., Li, Y., Zhao, T., Xu, J., ... & Yue, T. (2024). Effects of Cold Plasma on the Growth and Aflatoxin Production of Aspergillus flavus. *Food Bioscience*, 104552. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104552

Zheng, C., Kou, Y., Liu, Z., Li, C., Huang, Y., Yan, K., (2016). *Rapid disinfection performance of a touchable pulsed SDBD nonthermal plasma.* Ieee T Plasma Sci, 44 2667-2672. https://doi.org/10.1109/Tps.2016.2576558